



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

## **PhD THESIS**

# **Implementation and development of advanced algorithms of LFC-PIV in Stereoscopic PIV systems and its application to flows of industrial interest**

**Author:  
Sara Nauri**

**Director:  
José Ignacio Nogueira Goriba**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS**

**Leganés, 2008**



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

## **TESIS DOCTORAL**

# **Implementación y desarrollo de algoritmos avanzados de LFC-PIV en sistemas de PIV Estereoscópico para su aplicación a flujos de interés industrial**

**Autor:  
Sara Nauri**

**Director:  
José Ignacio Nogueira Goriba**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS**

**Leganés, 2008**

TESIS DOCTORAL

# **Implementation and development of advanced algorithms of LFC-PIV in Stereoscopic PIV systems and its application to flows of industrial interest**

**(Implementación y desarrollo de algoritmos avanzados de LFC-PIV en  
sistemas de PIV Estereoscópico para su aplicación a flujos de interés  
industrial)**

Autor: Sara Nauri

Director: José Ignacio Nogueira Goriba

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: Antonio Lecuona Neumann

Vocal: Christian Willert

Vocal: Jerry Westerweel

Vocal: Stefania Espa

Secretario: Pedro Rodríguez Aumente

Calificación:

Leganés, de de

*Al mio papà...*



## **RECONOCIMIENTOS**

Esta Tesis doctoral ha sido parcialmente financiada por los siguientes proyectos:

- COJEN: “Computation of Coaxial Jet Noise” (Proyecto Europeo), Specific Targeted RESEARCH Project EU Contract No. AST3-CT-2003-502790.
- “Técnicas avanzadas de Velocimetría por Imagen de Partículas (PIV) Aplicadas a Flujos de Interés Industrial” (Plan Nacional) DPI2002-02453
- EUROPIV 2 (Proyecto Europeo) CONTRACT N°: GRD1-1999-10835 y su proyecto asociado de cofinanciación DPI-2000-1839-CE
- TERMOPIV: “Combustión y transferencia de calor analizadas con PIV avanzado” (Plan Nacional) Ministerio de Educación y Ciencia ENE2006-13617

## AGRADECIMIENTOS

Ahí va... hemos llegado a la página más difícil de la Tesis... Llevo meses pensando en lo que voy a escribir... (He dicho ¿página? Como si fuera a ser solo una página... claro, ¿cómo que no?!)

Aiutooooo, mi sa che siamo proprio arrivati... Estoy intentando desdramatizar pero ya me empiezo a conmovier... Llegué a Madrid el 8 de junio del 2003, ya sé que es mucho tiempo y la Tesis no la empecé entonces, pero la verdad es que fué gracias a todos los que conocí y que se quedaron a mi lado desde ese día (y desde antes) que he podido acabar este trabajo. Sé que no se suele hacer así, pero a los primeros a quienes quiero agradecer es a mis papis, mi hermanísimo y mi abuelita y, ya que soy italiana, esta parte la escribiré en mi lengua materna. Grazie mamma e papà: grazie perché avete appoggiato la mia decisione di trasferirmi, per la ennesima volta, in un altro paese (e so che non eravate proprio d'accordo!), perché mi avete sempre fatto sentire speciale e per me é stata una importante riserva di autostima, grazissime per le vostre telefonate, visite (mamma combattendo le sue paure dell'aereo e papà la sua reticenza a fermarsi in casa con coinquilini sconosciuti ehehe). E grazie per non farmi troppe pressioni, soprattutto últimamente, perché torni a Roma! Eheheh. E come dice Néstor nei suoi ringraziamenti, come si ringrazia ai genitori per quello che fanno per i loro figli!?!?!?... Grazie per esserci genitorissimi! Siete i miei genitori preferiti! Grazie ovviamente al mio fratellissimo Dado, che mi ha raccontato a tutti come se fossi il genietto della famiglia e quasi quasi mi ci ha fatto pure credere ;)... A tutti e tre grazie per esservi trasformati in cartoni animati e avermi sopportato anche quando non ero proprio di umore perfetto: siete una fonte di energia inesauribile! Grazie anche a la mia nonnina che, tra le sue mille lamentele, ha sempre lasciato per me il posto di nipote superamata e mi ha sempre detto quanto bene mi vuole! Vi amo tantissimissimissimoooo!!!

Aunque no sea parte de la familia bueno yo si le considero como si lo fuera: ¡José! Mi super-Director de Tesis, maravilloso amigo y omnipresente hermano: se que no voy a encontrar palabras adecuadas ni a poder resumir en pocas líneas todo lo que me enseñaste en estos años. Gracias por apoyarme siempre, evidenciando todo lo bien que lo estaba haciendo sin quitar las críticas cuando no estabas de acuerdo conmigo, haciéndome, espero, evolucionar como investigadora, como profesora y, sobre todo, como persona. ¡Vaya paciencia tuviste conmigo! Me transmitiste tu pasión hacia la investigación junto a la alegría que conlleva cada descubrimiento, cada prueba afrontada y superada... Gracias a ti, a Antonio y a Pedro, por enseñarme la importancia del trabajo de grupo, de ayudarse mutuamente, de no dar nada por asumido y que todo lo que tenemos se debe a algo que se ha hecho antes. Gracias a los tres por haberme acogido con muchísimo cariño, por haber siempre confiado en mí, que, en mi opinión, es la mejor forma de sacar lo mejor de las personas (claro siempre que haya algo bueno en ellas ehehehe)... Y por ser unos investigadores llenos de pasión por vuestro trabajo: ¡sois el mejor ejemplo que se pueda querer! Non posso dimenticare il Mio Prof. Antonio Cenedese che mi ha trasmesso molte cose

negli anni passati nel lab di Idraulica Trasporti e Strade e visto che ci siamo, grazie al Mio Prof. di Matematica e Fisica del liceo Luca Dell'Aglio (ora é Prof. universitario): il suo miglior insegnamento, insieme alla matematica, é che non si deve mai dare del "poverino a nessuno" (parole sue dette con la faccia rossissima perché lo avevo difeso dagli altri alunni!)....mmm si, que estoy siendo demasiado sentimental y para salir de este estado cuál mejor agradecimiento que el que le debo a mi fantástico compi de despacho Néstor: por corregir mi español desde que llegué (obviamente sin dejar de subrayar lo mal que hablaba y que ¡¡¡cada día hablaba peor!!!) y por haberme hecho morir de la risa con tus interminables quejas sobre el mundo... Menos mal que nació Natalia: desde entonces ya eres un poco más humano!!! Mamma mia, ya estoy en la segunda página y no he agradecido ni a la mitad de la gente!! Vamos bien... Un abrazo gigante a mis colegas de la uni, que en todos estos años han compartido conmigo esta aventura doctoral. No os voy a nombrar a todos pero vuestros saludos en el pasillo o sonrisas o cigarrillos me han alegrado mucho! En particular a Javi con tus chupa-chups, regaliz y mucho cariño, además uno de los poquísimos con los que pude hablar de temas políticos sin pelear ejejeje. Geydy, que no ha dejado de buscarme y apoyarme, aún cuando empecé a encerrarme en el despacho para acabar y Mat con el que he compartido además la aventura de CoJeN: menos mal que estabas para calmar mis ansiedades ehehehe Merci, merci, merci!!!!...

Wow que fantásticos recuerdos los de Farnborough con Antonio, José, Mat y nuestros super Manolo y Carlos: que además de ser unos técnicos increíbles han estado cerca de mí en un momento muy difícil, ¡estas cosas no se olvidan!

I almost forgot to thank all those who were there in the NTF: it was a marvelous experience: the only woman in the facility: I thought I would get crazy (someone there for sure thought I was: not everyone can get use to have a running like crazy cartoon singing in the middle of the control room!!). A special thanking HUG goes to Craig, Kevin, Andrew, Paul, Tim, Chris and Paul (the seeding miracles), Charles, Juan, Franck, Andrew Bennet, and all those whose name I cannot remember but that made my stay there just perfect! It was so much fun even sleeping just 2 hours per night: you cannot come back from the NTF with experimental images (after waking up at 4 am, working till 7 pm, going to buy food and having dinner) and do not process some images before going to sleep (and that would be until at least 1 am) if the principal researcher is José Nogueira!!! :). Thank you for that too José: it was great! Y gracias a Antonio Lecuona por ayudarme a enfrentar mi miedo a las alturas desafiándome (él sabe perfectamente que con decirme que no voy a poder hacer algo, ¡me empeño en hacerlo!): sin conseguirlo me hubiera perdido una experiencia inolvidable!

A menudo cuando se está acabando un trabajo uno se acuerda de los que han estado justo al final: pero cómo no agradecer a María (Venegas), Antonio (Acosta), Alfaro, Mari Carmen, Ester, María (Pavón : que, sobre todo en los primeros 2 años de mi doctorado, me han ayudado tanto. Gracias a Estela por sus gestiones y simpatía!

Un abrazo y gracias gigantes van a Celia y Carmen que han sido, junto con José y a menudo Antonio, las únicas con las que hablar cuando me quedaba en la uni hasta muy muy tarde. Las dos me habéis dado mucho mucho cariño (además de intentar que mi despacho fuera un poco más ordenado) y no sabéis lo bien que me ha hecho!

Danke a Uwe y Karsen de *La Vision*, por su ayuda! And to all those who studied PIV and published their works (please check the bibliography for their names ☺ and read the Thesis to know how important they are for this work).

Grazissimissime alla mia famiglia.. tutta e in particolare a zio Dori, zio Davide, zia Elena, zio Lullo, Patrizia, Sandra, zio Lillo e Lilly, Nadia, Roger, Laura, Stefano, Karen, Robert, Clemente, Miriam, zia Ivette e i miei fantastici quasi nipotini: le tre pesti di Laura e Stefano (Eithanissimo, que non voleva lasciarmi andare via dal suo Bar-Miztvá, Yoram e Michael) e quelle di Roger e Nadia (Rebecca, che mi chiama “zia” e da anni ormai mi riesce quasi a far sentire come tale... e chattiamo pure in msn!!! y el hombre scimmia Gavriel, che ti salta addosso per darti quegli abbracci abbracciosi di cui tutti avrebbero bisogno almeno una volta a settimana... non di più per ovvie conseguenze alla spina dorsale)... Grazie per esserci tutti!

Claro, siempre se dejan para el final, DULCIS IN FUNDO diría yo (jaunque el fundo parece estar lejos todavía!), porque son los que te tienen que soportar toooooodos los días o casi (algunos solo por correo debido a distancias físicas jeje): LOS AMIGOS!!! La verdad es que a muchos de los que agradecí hasta ahora les considero amigos también ¡que afortunada que soy! Pero un GRAZIE, GRACIAS, MERCI, THANK YOU, ευχαριστω, OBRIGADO, DANKE, ありがとう, (para el japonés y el griego he necesitado a Google) especial va para todos los maravillosos amigos que he conocido antes y durante mi estancia en Madrid y que siempre han “tifado per me” (traducción al español: que me han apoyado siempre) incluso desde muy lejos. Grazie a Federica, Deborah, Simone, Claudia, Lollo, Marge, Vincenzo, Gino, Stefy, Moni, Emme, Carlo che non solo mi sono venuti a trovare (a parte glu ultimi 3), ma non hanno mai smesso di dirmi: “Allora sta tesi quando la finisci? Quando torni a Roma?” E questo non sapete quanto bene mi ha fatto! Thanks to Lee and Dom: my wonderful crazy lazy friends!

Los que me han apoyado en todo, incluso haciéndome de enfermer@s cuando lo necesité fueron los muchos amigos que a menudo llamo mi familia en Madrid. El orden que elija siempre será una injusticia, pero bueno, la que ha estado más cerca de mi, que ha propuesto un brindis a que ya había depositado la Tesis y me ha ido a comprar los medicamentos y me ha echado un montón de broncas y se ha tragado las mías y con la que he compartido más de estos 4 años y medio es Cristina: estás en pole position!!! Pero te juegas la palma de oro con José, mamma e papà ¡¡¡que lo sepas!!! Ejeje Por cierto, obviamente es la que me acaba de llamar para decirme ya vale, que estoy fatal y que acabe de una vez!!! Gracias a Martin, que fue uno de los primeros, junto a Cris, que conocí y que sigue mi amigo: ya solo por eso te mereces un premio, cuantas cosas

vivimos juntos con vos! Y a sus compis de piso que en poco tiempo ya se habían convertido en amigos también. En orden aleatorio: gracias a Nacho por las muchísimas charlas y tiempo y sueños y cosas compartidas, a Nico, a David, gracias Feredico por ir a Roma a ver la final del mundial conmigo, por no dejar nunca de tomarme el pelo, de contarme tus historias y de hacerme morir de las risas: c'est perfeeecto!. Mille grazie a Arturito, Merci a Aurelie y a su confianza, a Luis, a Nicole, **ありがとう** a Aki, a Vincent, a Andrea, a Flow, a Pascaline, a Laura, la superpareja Álvaro y Lara... Nooo Sole, que no me olvido de vos: justo ahora iba a empezar la lista de los compis de piso: vosotros sí que habéis tenido que soportarme a todas horas jejeje. Gracias linda por toodo lo que compartimos, dejamos de compartir y volvimos a compartir. **ευχαριστω** a Alekos y a Inma (vaya cenas que me hacíais encontrar el primer año en Madrid cuando era capaz de volver de la universidad a la 1 de la madrugada y por las clases de español evolucionao.). Gracias a Elena, Evyssimoooooooo, a Andres, a Helio, a Marce...uff, cuanta gente, seguro que aquí estaría la enésima crítica por mi locuacidad de Louis: personaggio controverso (¡¡para usar un eufemismo!!) dei miei ultimi 3 anni e mezzo, será porqué le conocí en un curso de turbulencia??? Anche se in parte hai contribuito a che ci mettessi tanto a finire il dottorato, devo riconoscere che, quando hai voluto, mi hai aiutato a sdrammatizzare. Et toi tu m'as fait chanter et jouer de la guitareeeee (un poquito...)!!! Combien de rires!! Merci a toi aussi! Alla faccia se sono brava a cercare sempre il positivo delle cose! Uff espero no se me olvide nadie: ni que fueran los agradecimientos para mi premio Nóbel! Sigamos con mis compis de piso: Nuno: cuantas charlas delante de una peli o en la cocina para que acabara pronto con la Tesis: insistiendo en que luego el mundo se me iba a abrir delante!! A ver si es verdad ejeje. Merci Alphonse, Mari y Roque: cuantas comidas y cenas me habéis preparado sobre todo en las últimas semanas (meses?!?) que he pasado delante del ordenador: quizás cuantos kilos hubiera perdido si no hubiera sido por vosotros !!! mmm debería agradecerlos o no? Por no hablar del soporte moral!!! Y otros compis de piso virtuales: porqué siempre estan ahí para escucharme: Andy e soprattutto Sheila. Certo venire alla mia Tesi ti sarebbe impossibile vista la tua paura per gli aerei, pero una video conferenza per assistere lo stesso come la vedi? Sicuro che Andy non avrebbe problemi a organizzare qualche connessione... ¿karmica?

Oh noooooooooo: se me está acabando la cuarta página y ni me he dado cuenta! Y ahora ¿¿qué hago?? Bueno mamma, papá, Dado, Nonna, José, Amigos (ahaha: miedo de que iba a repetir toda la lista ¿verdad?) os saludo, beso, abrazo a tod@s! ¡Agur! Salut! Dasvidanja! Ciao (con la manina)! y perdonarme los que no están en estas páginas (que además habrán leído todo este papiro (¿*novela* en español?) y ¡no se han encontrado!): es que son las 2.19 y mañana tengo que madrugar!

Sara...

Alias: Sarottolo, Dyna, Peanut, Saricka, Mademoiselle Grenouille, Ickina

## CONTENTS

<b>ABSTRACT.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>2. OBJECTIVES .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Definition of the main objectives of the Thesis.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Methodology followed in the development of the PhD Thesis.....</b>	<b>5</b>
<b>3. PIV: FUNDAMENTOS .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. El cálculo del desplazamiento mediante análisis de imágenes.....</b>	<b>8</b>
<b>3.2. Las técnicas de procesamiento .....</b>	<b>10</b>
3.2.1. El pre-procesado .....	11
3.2.2. El procesamiento de las imágenes .....	12
3.2.3. La transformada rápida de Fourier o Fast Fourier Transform (FFT) .....	13
<b>3.3. Interpolación subpixel .....</b>	<b>15</b>
<b>3.4. Errores intrínsecos: peak y group locking .....</b>	<b>16</b>
3.4.1. Algoritmos con interpolación subpixel (Subpixel peak-fitting).....	17
3.4.2. Geometría del sensor .....	17
3.4.3. Dimensiones de la ventana de interrogación.....	17
3.4.4. Group locking .....	18
<b>4. NECESIDAD DE RESOLUCIÓN, GRADIENTES Y ROBUSTEZ: TENDENCIAS ACTUALES .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Límites físicos de resolución espacial en PIV con métodos iterativos .....</b>	<b>19</b>
4.1.1. El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon .....	19
4.1.2. Media simple y media móvil .....	20

4.1.3. Recuperación de la información para $1 < W_s$ en el caso de procesos no iterativos .....	22
4.2. El offset de las ventanas de interrogación y el método multigrid .....	23
4.3. Recuperación de información para $\lambda < W_s$ : LFC-PIV. Descripción de la técnica .....	26
4.4. Aplicación de métodos avanzados de 2D2C PIV en lecho fluido .....	30
<b>5. ESTERO-PIV: ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>33</b>
5.1. El error en el cálculo de la velocidad con sistemas PIV convencionales	33
5.2. Configuraciones estereoscópicas.....	36
5.2.1. Sistemas de traslación.....	36
5.2.2. Sistemas de rotación .....	39
5.2.3. Estéreo-PIV con múltiples planos .....	42
5.3. Análisis de los errores.....	44
5.4. Métodos de reconstrucción.....	47
5.4.1. Reconstrucción geométrica.....	47
5.4.2. Reconstrucción por calibración .....	48
Métodos de calibración 2-D .....	48
Métodos de calibración 3-D .....	50
5.4.3. Reconstrucción por Auto-Calibración utilizando imágenes de partículas .....	52
Calibración con el método del pinhole.....	53
Corrección de la función de mapeo.....	54
<b>6. DEVELOPMENT OF THE COMBINED STEREO-LFC PIV     SYSTEM AND TOPICS TO EVALUATE .....</b>	<b>56</b>
6.1. Descriptions of the tools for the Stereo-LFC PIV set-up, calibration and 3D reconstruction.....	57
6.1.1. Arrangements of the cameras .....	57
6.1.2. The empirical calibration process.....	58
6.1.3. 3C vector reconstruction.....	59
6.2. Inclusion of the LFC-PIV algorithm in the process .....	61

---

<b>6.3. Key factors to consider .....</b>	<b>62</b>
<b>6.4. Error analysis: considerations .....</b>	<b>64</b>
6.4.1. Integration time error vs algorithm error .....	64
6.4.2. Frequency response .....	65
<b>7. TESTS ON SYNTHETIC STEREO-PIV IMAGES .....</b>	<b>69</b>
<b>7.1. Synthetic image generation .....</b>	<b>69</b>
7.1.1. Flow field description and error assessment .....	69
7.1.2. Image generation description.....	72
<b>7.2. Large scales .....</b>	<b>73</b>
7.2.1. Vorticity tests.....	74
7.2.2. Out-of-plane displacement tests .....	76
7.2.3. Vorticity combined with out-of-plane displacement tests.....	77
<b>7.3. Small scales .....</b>	<b>78</b>
7.3.1. Vorticity tests.....	79
7.3.2. Out-of-plane displacement tests .....	82
7.3.3. Vorticity combined with out-of-plane displacement tests.....	85
<b>7.4. Resume of the study on synthetic images.....</b>	<b>88</b>
<b>8. APPLICATION TO REAL IMAGES .....</b>	<b>90</b>
<b>8.1. Small facility experimental set up .....</b>	<b>91</b>
8.1.1. Experimental results .....	93
<b>8.2. Semi industrial facility experimental set ups .....</b>	<b>94</b>
8.2.1. Vortex street at one of the lips of a coplanar nozzle: experimental set-up.....	95
8.2.2. Cross cuts experimental set-up: short cowl vs. serrated nozzle .....	99
<b>8.3. Experimental results .....</b>	<b>101</b>
8.3.1. Vortex street experimental results in the coplanar nozzle.....	101
8.3.2. Cross cuts experimental results: short cowl vs. serrated nozzle .....	106
<b>9. CONCLUSIONS .....</b>	<b>110</b>



<b>9.1. System Developed.....</b>	<b>110</b>
<b>9.2. Additional contributions .....</b>	<b>111</b>
<b>9.3. Future work .....</b>	<b>112</b>
<b>9.4. Publications.....</b>	<b>113</b>
<b>BIBLIOGRAPHY .....</b>	<b>114</b>

## **ABSTRACT**

The aim of this PhD Thesis is the implementation and development of Local Field Correction (LFC) PIV advanced algorithms within Stereoscopic PIV systems to allow their application to real flows of industrial interest. The motivation comes from the need of accurate measurements in large facilities. In particular, the Stereo-LFC PIV is applied within this PhD Thesis to large scale experiments in the European project CoJeN (Computation Coaxial Jet Noise) to provide the numeric simulation groups with enough accurate data to validate their codes.

Chapter 3, 4 and 5 are dedicated to the description of the different techniques of interest for this Thesis. A wide bibliographic research is presented establishing the basis for the work. In particular, chapter 3 is dedicated to give an overview of the fundamentals of the particle image velocimetry techniques together with a characterization of the intrinsic PIV errors. Chapter 4 analyzes the resolution and robustness issues in relation to the advanced techniques of interest in this Thesis. Chapter 5 examines the convenience of stereo systems, analyzing the limitations of conventional PIV with a single camera, and describing how these limitations can be overcome by adding a second camera. Subsequently, a discussion on different stereoscopic configurations used by different authors follows together with an evaluation of the advantages of each set-up. An error analysis associated with the various configurations is also reported.

The second part of the Thesis (chapters 6 to 8) is dedicated to the development and description of the new combination proposed and its application both to synthetic and real images. This part contains the main original contributions of the Thesis.

Chapter 6 is dedicated to the description of the different steps that lead to the development of the Stereo-LFC PIV. A theoretical approach to qualitatively predict the abilities of different advanced PIV algorithms is proposed.

Chapter 7 studies the performance of the new method proposed through its application to synthetic images at typical stereo PIV conditions. The analysis includes comparisons with other actual algorithms and is performed for different flow field scales and at different resolutions.

Finally, Chapter 8 reports on the results obtained when applying the Stereo-LFC PIV to real images, both at laboratory and at industrial scale. A comparison between these results and those obtained by the other advanced algorithm used in chapter 7 is also made in order to check the coherence with the results obtained with synthetic images. The measurements at semi industrial scale are part of the ones done at the CoJeN project that motivated the development of the technique.

# 1. INTRODUCCIÓN

Hoy son muchos los ámbitos tecnológicos donde el estudio de los fluidos cobra interés: medioambiente, medicina, biología, combustión, etc. En particular, en algunos temas como la generación de calor, es difícil imaginarse ejemplos en que no entre en juego el manejo de algún fluido.

Muchas variables pueden ser medidas para obtener información sobre un campo fluido, pero la obtención directa de la velocidad del mismo es, sin dudas, de gran utilidad para comprender los fenómenos involucrados.

Como herramientas de medición de velocidad en fluidos se pueden citar el tubo de Pitot y la sonda de hilo caliente que efectúan medidas en zonas pequeñas y puntuales. Sin embargo, estas técnicas de medida resultan claramente intrusivas, dado que las medidas realizadas requieren la presencia de la sonda de prueba para la adquisición de los datos.

Entre aquellas con la propiedad adicional de ser no intrusivas, podemos encontrar la técnica óptica de anemometría Láser Doppler.

En muchos casos, sin embargo, es importante la obtención de medidas detalladas del campo de velocidad local alrededor de un cuerpo inmerso en un fluido y, al mismo tiempo, de una visualización de las estructuras características del flujo considerado.

Esta necesidad de obtención de medidas puntuales simultáneas, extendidas a un amplio campo de fluido, puede realizarse mediante el uso de velocimetría por imágenes de partículas (PIV), que presenta una fase de adquisición de imagen digitales de partículas (utilizadas como sembrado) en suspensión en el fluido y una fase de análisis de las imágenes. Esta técnica presenta la ventaja adicional de ser no intrusiva a no ser que se requiera un sembrado especialmente denso.

En muchas ocasiones, sin embargo, se da la necesidad de una información más completa del flujo a medir. Estas situaciones se dan, por ejemplo, cuando el set-up experimental no permite garantizar la ortogonalidad del sistema de adquisición al sistema de iluminación (resultado así en una visión distorsionada del área de interés), o bien cuando el flujo a medir tiene una cierta componente, más o menos relevante, ortogonal al plano de medida.

En estas situaciones, una visión única no puede determinar la profundidad de un objeto a lo largo de las líneas de visión. En cambio, la componente  $z$  de objetos a lo largo de líneas distintas a la de visión se percibe en la perspectiva de la imagen.

El método de utilizar dos cámaras para obtener la percepción de profundidad, ha sido practicado durante muchas décadas en varias aplicaciones de ingeniería. Este sistema de cámaras gemelas simula la visión binocular que permite a los seres humanos distinguir entre objetos cercanos y lejanos.

Cuando se mide el desplazamiento tridimensional de partículas, se puede caracterizar la situación con tres incógnitas ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ). La proyección desde un solo punto de vista, proporciona dos ecuaciones. La adición de un segundo punto de vista (visión estereoscópica), provee dos ecuaciones adicionales, que se pueden utilizar para obtener la información sobre la tercera componente. Nuestros ojos registran estas visiones simultáneamente y el cerebro es capaz de combinarlas en tiempo real y proveer una percepción tridimensional.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Hinsch (1995), un sistema de medida puede ser etiquetado como  $(k, l, m)$ , donde  $k = 1, 2, 3$  indica el número de componentes de velocidad medidas,  $l = 0, 1, 2, 3$  es el número de dimensiones del dominio de medida y  $m = 0, 1$  indica si el tiempo de grabación es instantáneo o continuo, respectivamente. La Tesis se centra en el caso  $(3, 2, 0)$ , indicado en la Tesis como 2D-3C PIV. En particular, se examinan en detalle las técnicas estereoscópicas que utilizan PIV con correlación espacial.

Todos los sistemas estereoscópicos, a pesar de la gran variedad de configuraciones posibles, deben satisfacer a la condición básica de grabación de dos vistas distintas y simultáneas del mismo objeto. Estas dos vistas se combinan, a través de uno de los múltiples algoritmos disponibles, para reconstruir el campo tridimensional. Obtener la tecnología necesaria para realizar PIV en configuración estereoscópica es un objetivo que perseguía el grupo de investigación en el que se enmarca esta Tesis en el momento de su inicio.

Por otro lado, dicho grupo de investigación, había desarrollado una técnica que permite llegar a una resolución mayor que en los sistemas tradicionales de PIV y que ha demostrado tener una notable reducción de las exigencias sobre la calidad del sembrado. Este sistema denominado Local Field Correction (LFC) PIV (Nogueira et al 1999 y 2001) se ha diseñado e implementado en el pasado en imágenes de 2D2C PIV.

Dados estos dos elementos en el entorno de investigación donde nace esta Tesis, se decidió extender el LFC-PIV al ámbito estereoscópico. El análisis de cada sistema por separado, su estado de desarrollo en la literatura científica y sus características principales, son los pasos que se han seguido para la elección de la configuración y modo más apropiados en la realización de la combinación. Así como para definir las pruebas a realizar sobre datos sintéticos que permitiesen su evaluación.

Esta Tesis, se desarrolla con el objetivo final de la aplicación del sistema de Estéreo-LFC PIV desarrollado a flujos de interés industrial. Se inicia dentro del proyecto del plan nacional DPI2002-02453 “Técnicas avanzadas de Velocimetría por Imagen de Partículas (PIV) Aplicadas a Flujos de Interés Industrial” con el propósito de aplicarse en experimentos a escala de laboratorio. Una vez iniciada surge la oportunidad de participar en el proyecto europeo Cojen (Coaxial Jet and Noise). Dentro del cual se amplía el objetivo a la medida a escala industrial. En particular, en este proyecto que financia gran parte de este trabajo, las medidas de PIV se efectúan con la intención de usarlas para validación de modelos numéricos. En estos tipos de medidas, además de la mencionada necesidad de su simultaneidad en zonas amplias del campo fluido, se tiene que satisfacer también aquella de encontrar soluciones que optimicen la resolución espacial, la exactitud de la medida y la robustez de los resultados. En el campo industrial, las dificultades que se pueden encontrar son de vario tipo: entre ellas se puede resaltar por ejemplo la dificultad de acercamiento de las cámaras a la zona de estudio, de hecho, en algunos casos una cercanía excesiva es inviable por razones como excesivas vibraciones, riesgos para la cámara etc. Adicionalmente, en el caso de este proyecto, varios de los participantes tienen que efectuar las medidas simultáneamente, tanto por necesidades científicas como económicas. Esta razón condiciona la localización y manejo de los dispositivos experimentales reduciendo la posibilidad de optimización de las adquisiciones. Junto con eso se puede resaltar que no siempre se puede conseguir un sembrado adecuado en todos los puntos de medida. Estos aspectos fomentan la preferencia de soluciones de medida robustas frente a la reducción de la calidad en la adquisición de imágenes de PIV.

Con este marco, el siguiente capítulo detalla los objetivos principales de la Tesis junto con las metodologías utilizadas para conseguirlos.

## 2. OBJECTIVES

The first objective of this PhD Thesis, as can be easily deduced from the introduction, is the development and implementation of LFC-PIV algorithms in stereoscopic systems. In the beginning of the doctorate, the primary goal was to develop this technique and implement it on small scale laboratory set-ups. The involvement of the research group in a European project for measurements on an industrial scale expanded the targets, including its implementation on a large scale.

Until this Thesis work started, Stereo-PIV systems had not yet been used by the research group. Due to this fact, the initial work of this Thesis included the compilation from the sources available of the information needed to allow the group to begin with this type of measurements. This required extensive literature research provided the necessary overview and knowledge of the current state of progress of this technique. At the same time, different systems and devices currently available at a commercial level were evaluated. The one that seemed most appropriate to accomplish the objectives that were intended to be achieved was selected.

As for the implementation of advanced PIV algorithms, although the research group had a wide experience on the subject, the PhD candidate has been initiated to this topic within this Thesis. Given the specificity of this area, a familiarization and deepening on the subject was necessary and consequently the literature search has been extended in that direction.

The use of the advanced LFC-PIV technique, which was designed, developed and implemented in 2D2C systems by the director of this Thesis, has given the candidate the opportunity to come into contact with the original code of the algorithm. The starting point for the author of this Thesis, without prior knowledge in advanced systems, has allowed a critical and objective assessment of the performances of the various methods, focusing on key aspects of the stereoscopic configuration.

The main purpose of the abovementioned European project, which expanded the scope of this Thesis to its application on an industrial scale, is to obtain experimental measurements accurate enough to enable the validation of the numerical codes developed by the other partners. Accordingly, in this Thesis, a detailed study, to establish whether the system developed can measure more accurately than other available systems, must be included.

### 2.1. Definition of the main objectives of the Thesis

Specifying the concepts previously exposed, the main objectives of this Thesis are summarized in the following points:

- Familiarization with the current stereoscopic techniques and configurations, including active participation in the acquisition of this technology by the research group in which the Thesis is being developed.  
This study includes the selection of the most appropriate configuration for the type of measurements to perform within projects related to the Thesis. It should be noted that this is the first time in which Stereo-PIV systems are used at the university where this work is being developed.
- Familiarization and use of the advanced 2D2C algorithms available that present advantages in terms of robustness, ability to cope with high velocity gradients and spatial resolution.  
Related to this aspect, two algorithms are considered in detail for this study.

Since the beginning of this Thesis, one of these algorithms was available. This one was the Local Field Correction 2D2C PIV system. Once the related studies began, for the development of the Thesis the other one was acquired. It consists on a Multigrid 2D2C system enhanced with image distortion and using smoothing to avoid the associated instabilities. The familiarization with this last system includes training on the software, directly received from the developers, as well as the realization of the system adjusting. The possibility of such software to interact with external routines via macros in its stereoscopic version has been essential for the choice of this system, in view of the development of the Stereo-LFC PIV combination.

The familiarization with the available advanced 2D2C techniques (LFC and commercial Multigrid) includes its application to real images. This application is one of the goals of the project which funded the first training phase of the present author, CICYT project: *"Particle Image Velocimetry (PIV) Advanced Techniques Applied to Flows of Industrial Interest."* In particular, the tests and evaluations are performed on flows in fluidized beds.

- Development of a Stereo-LFC PIV system.  
For this task, the know-how of the "macro" programming language used in the commercial software has to be understood. Allowing to determine the extent of possible use of such software in terms of interaction with external routines for the development of the combination of a stereo system with LFC-PIV systems. In addition to adequate internal macros, external routines that ensure compatibility of the results and formats of the LFC with the commercial system have to be programmed.
- Evaluation of the actions of the developed system on simulated data.  
The evaluation of the system's capabilities is a basic step to appreciate its usefulness. A study on the most appropriate methodology to follow for this task will be necessary. The research group has used synthetic images in the past on 2D2C systems. In this Thesis, the generation of synthetic images has to be extended to stereoscopic configurations.
- Application on real images and evaluation of performances. The application on real images encompasses three goals.
  - (i) Application of the system in experiments at the laboratory scale. This task is performed both with the objective of checking the operation of the system developed and as a reference and starting point for the measurement campaign of the European project in which this Thesis is involved.
  - (ii) Implementation of the system on experiments at the industrial scale. It has been decided to seize the opportunity to implement the system developed in this Thesis in a European project on an industrial level. This works as an additional test bench for checking its performances.
  - (iii) Results obtained with real images, both at the laboratory and industrial scales, have to be contrasted with the ones obtained on simulated data. Checking the coherence of both results increases the confidence of the suitability of the simulated data.

## **2.2. Methodology followed in the development of the PhD Thesis**

Once the objectives were determined for the development of the different phases of this Thesis, the methodology which is defined below was followed:

- Familiarization with the stereoscopic techniques and participation in the system acquisition decisions. For this task, the available knowledge sources are used. In particular, a bibliographic review is made and continuous contact with the collaborating researchers is maintained.

- Familiarization with advanced 2D2C systems. As commented in the previous section, in addition to the bibliographic review and contact with the researchers from the group, this task is completed with its practical application. In particular, the LFC-PIV, developed within the author's research group, and the Multigrid system of the commercial software are applied on fluidized bed flows. The different abilities of the algorithms and the advantages of using one or the other are studied on the obtained images.
- Development of the Stereo-LFC PIV system. The methodology to be followed with respect to this task is based on the previous two paragraphs of this section. By way of those actions, the optimum strategy for the development of the system together with minimal programming of new items is decided. The purpose is to reduce the possibility of error in such programming and to maximize the ability to compare the results obtained with the developed system with the one initially available.
- Analysis of performances. In this direction, the use of synthetic images seems the most appropriate one. The strategy within this Thesis consists of the development of a synthetic image generator in stereoscopic configuration. Such a generator should consider alternatives to evaluate performances in terms of parameters related to robustness, velocity gradients and spatial resolution.

In addition to the image analysis, theoretical predictions qualitatively indicating the consistency of the results obtained should be developed. These tools, along with the analysis on real images is in line with increasing the confidence of the suitability of the simulated data and helps in the identification of the basic parameters of comparison for determining the advantages that the new system can provide in terms of robustness and resolution.

- Application of the system on real images. Since this is the basic purpose of any development of a new system, the methodology is very much in line with the objective itself. The developed system is analyzed on small scale set-ups to acquire the basic experience that allows the subsequent implementation at the industrial scale. The test should be designed in order to verify consistency with the results obtained from the study with synthetic images. With the information obtained, the new technique is applied to real flows of industrial interest along a measurement campaign at the semi-industrial scale. To evaluate the different consequences of the application at the industrial level, the present author has to actively participate in the set up of the measurement system, its installation in the location where the measurement takes place and in the measurement campaign itself. Once the measurements are obtained, the coherence of the results obtained with synthetic images should be verified as in the laboratory scale case, confirming the overall performance.

### **3. PIV: FUNDAMENTOS**

El PIV fue propuesto en el 1904 por Ludwig Prandtl. La imposibilidad, en esos años, de adquirir un número elevado de imágenes y de realizar un análisis suficientemente preciso que permitiese resultados cuantitativos además de cualitativos, llevó entonces a considerar esta técnica como simple instrumento de visualización del campo de velocidades.

Con la llegada de los ordenadores y de la tecnología digital, ha sido posible transformar esa técnica de visualización en una técnica de medida. Esto se debe a la posibilidad de adquirir y recoger un número muy elevado de imágenes y también realizar, en tiempos muy restringidos, análisis bastante precisos del campo de velocidad que pueden proporcionar medidas suficientemente fiables.

Para ilustrar propiamente esta técnica a continuación se comentan las dos fases principales de una medida hecha por PIV con tecnología digital (Willert y Gharib 1991).

- La primera es la fase de adquisición de las imágenes. Consiste en la adquisición de una zona del campo fluido en video digital o en imágenes fotográficas que posteriormente se digitalizan. Las imágenes deben corresponder a una serie de fotogramas bajo unas determinadas especificaciones de los intervalos temporales que caracterizan la adquisición (tiempo de exposición y lapso entre imágenes).

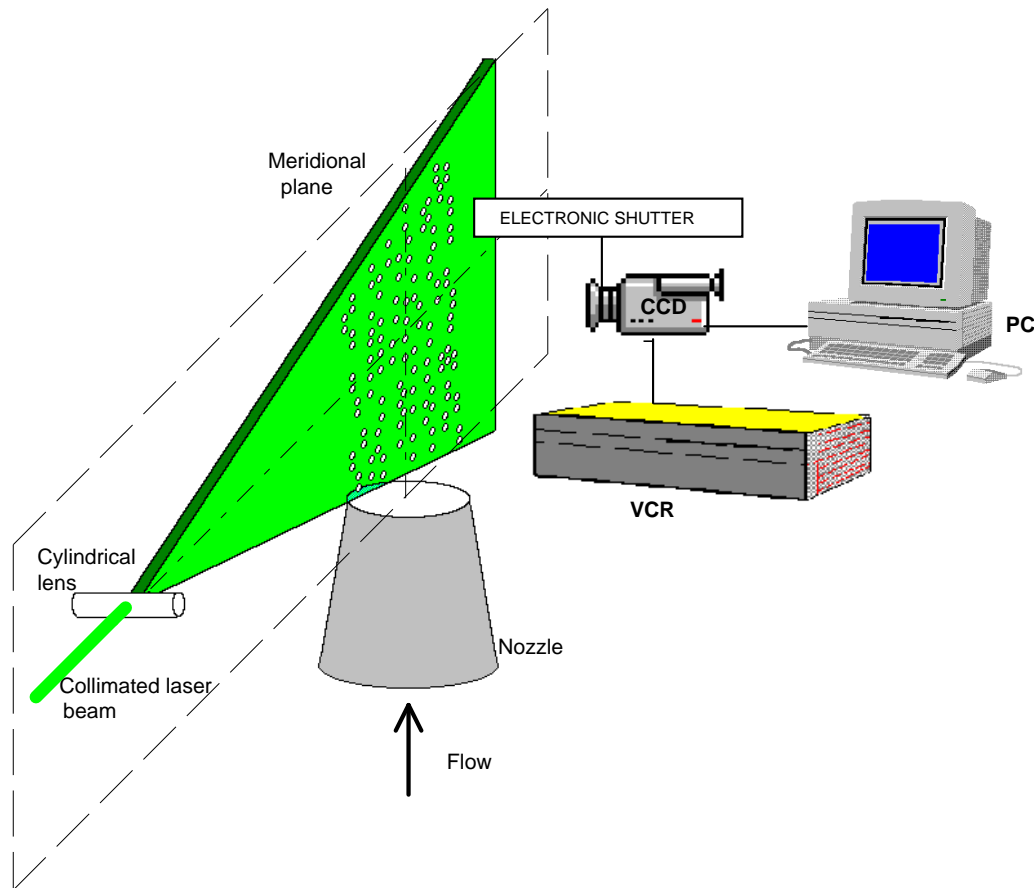
El fluido a medir tiene que ser transparente a la radiación empleada. Las partículas han de ser lo suficientemente pequeñas para poder inferir, a partir de su movimiento, el del fluido. En el capítulo 8, relativo al análisis de imágenes reales de interés industrial, se evidencia como la elección del sembrado es un aspecto de importancia capital de todo el proceso de medida.

Las imágenes obtenidas proporcionan las posiciones sucesivas de las partículas durante su recorrido dentro de un plano de luz que, adecuadamente colocado, permite la iluminación y por lo tanto la visualización del campo fluido. Este plano de luz está generado usualmente por medio de un láser que cruza una sucesión de lentes, esféricas y cilíndricas, y espejos, para poder controlar el espesor del plano y la colocación del mismo, parámetros fundamentales para la calidad de las imágenes adquiridas.

El control del espesor del plano permite reducir el número de partículas que, en el paso de un fotograma al sucesivo, salen de la zona encuadrada como resultado de una componente de velocidad ortogonal dicho plano de luz. Su posición es de capital importancia para definir con precisión la zona del campo fluido a analizar y las componentes de velocidad calculadas con respecto a un sistema de referencia acorde con la zona de prueba.

- La segunda fase consiste en el análisis de las imágenes obtenidas. Esta fase se realiza con el objeto de obtener el campo de desplazamientos y por lo tanto el campo de velocidad (siendo conocido el intervalo temporal entre dos fotogramas sucesivos), en los nodos de la malla de medida de la zona enmarcada. Tras lograr esto, es posible obtener otras magnitudes de interés para el estudio del flujo, como por ejemplo, la vorticidad y otras cantidades derivadas.





**Figura 3.1.1:** Esquema de un sistema de medida PIV

En la figura 3.1.1 se puede ver el esquema de un sistema típico de medidas de PIV. El haz del láser se guía con un sistema de espejos hasta situarlo en la posición deseada. Una vez alineado, se abre en forma de plano de luz mediante las lentes necesarias que permitan realizar las medidas deseadas en la zona del campo de interés. En ocasiones se precisa de sistemas adicionales de espejos tras haber abierto el haz para aumentar el grosor del plano o la potencia de iluminación.

En el exterior de la zona de prueba, en una posición tal que el eje óptico de la video-cámara sea ortogonal al plano láser, se pone el dispositivo de adquisición, conectado con un sistema de transferencia de imágenes que permita su almacenamiento y análisis.

En la fase de adquisición, es importante conocer el factor de magnificación que permite pasar de las distancias medidas en píxeles a las correspondientes en metros, que son las de real interés.

Tras estas breves nociones, este capítulo se ocupará principalmente de profundizar la segunda fase del análisis, reservando, como se ha dicho anteriormente, al capítulo relativo a las medidas la tarea de explicitar las dificultades inherentes a la primera.

### 3.1. El cálculo del desplazamiento mediante análisis de imágenes

El propósito del software de análisis es obtener medidas del campo de velocidad precisas y con la mayor resolución espacial posible, en caso de necesitarse, para los distintos flujos laminares y turbulentos en diversas condiciones dinámicas y geométricas.

En esta sección se pretende dar una visión general de las operaciones que caracterizan un algoritmo de análisis de PIV. Para ello es importante aclarar el concepto de análisis de imágenes y definir los instrumentos a disposición del experimentador tras acabar la fase de adquisición.

En la fase de adquisición, el área de interés está encuadrada con una cámara que permite recoger un conjunto de imágenes separadas en intervalos temporales conocidos. El PIV que se

describe se basa en varias imágenes de una sola exposición (PIV de correlación cruzada (Willert y Gharib 1991)). A diferencia del de doble exposición en una sola imagen (PIV de Autocorrelación (Adrian 1984, Pickering y Halliwell 1984)) que es poco utilizado por sus limitaciones como, por ejemplo, la dificultad a la hora de determinar el sentido del vector velocidad. En estas condiciones, las informaciones que se necesitan para continuar el análisis son:

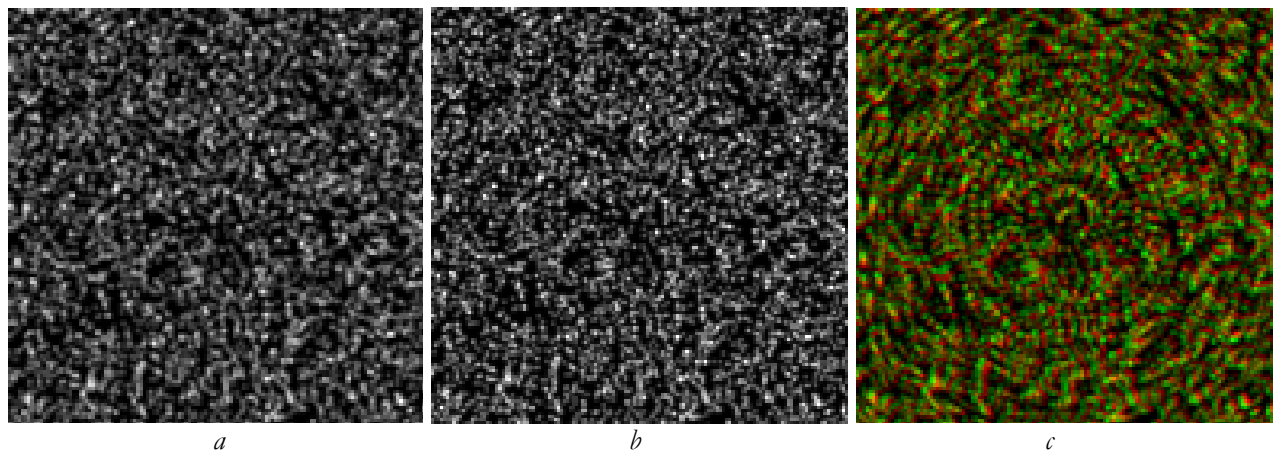
- Las imágenes constituidas de valores discretos de luminosidad para cada píxel, que permiten identificar las partículas que se han enmarcado, representadas por elementos (píxel) más luminosos que el fondo.
- El intervalo temporal existente entre estos
- El factor de magnificación que se puede calcular, durante la fase de calibración, midiendo el número de píxeles que corresponde a una longitud conocida.

En un sensor de imagen actual tipo CCD, las imágenes constan de un número discreto de píxeles cada uno con su valor de intensidad de luminosa. Tal intensidad, para una imagen de 8 bits, como las que normalmente se utilizan, puede variar entre el valor mínimo igual a 0 y el valor máximo, que para codificación de 8 bits es igual a 255.

Podemos por lo tanto pensar en las imágenes como a matrices en las cuales cada elemento corresponde al valor de intensidad luminosa de un determinado píxel y, por lo tanto, el conocimiento de la distribución de estos valores en la matriz permite obtener informaciones sobre la distribución de las partículas en la zona analizada.

Comparando las distribuciones relativas a dos fotogramas distintos, la información a disposición permite conseguir el campo de desplazamientos del grupo de partículas en el paso desde la primera a la segunda imagen en examen, como se aclarará a continuación.

En la figura 3.1.2 se puede apreciar una pareja de imágenes de PIV y el campo fluido al superponer las dos.



**Figura 3.1.2:** Ejemplo de imágenes de PIV. **a)** Primera exposición. **b)** Segunda exposición. **c)** Superposición de las dos donde se puede apreciar el torbellino resultante (imagen inicial en verde imagen final en rojo)

Con buena aproximación podemos suponer que el desplazamiento de las partículas de sembrado corresponde a aquel del fluido si estas partículas son lo suficientemente pequeñas y de densidad muy similar a aquella del fluido, para poder inferir, a partir de su movimiento, el del mismo. Si se satisfacen estas condiciones y el tiempo entre imágenes es suficientemente pequeño, es posible calcular el campo de desplazamiento del flujo en examen y por lo tanto el campo de velocidad buscado, simplemente analizando las imágenes tomadas.

Para calcular el desplazamiento, se pueden seguir básicamente dos técnicas distintas: la velocimetría por rastreo de partículas (PTV) (Lewis 1987, Hassan 1991, Nauri 2002), que se basa en el cálculo de la trayectoria de cada partícula presente en las imágenes, y la Velocimetría por Imagen de Partículas (PIV) que nos ocupa, que se basa en el cálculo del desplazamiento medio de

grupos de partículas en porciones pequeñas del campo, denominadas ventanas de interrogación, y definidas con más detalle en el apartado 3.2.2.

La primera técnica, que proporciona medidas en una malla de cálculo no equiespaciada, se puede utilizar si el número de partículas en cada imagen considerada es reducido y permite identificar cada partícula de un fotograma al sucesivo, obteniéndose el cálculo de la trayectoria.

La segunda es aplicable en presencia de un número elevado de partículas en cada ventana de interrogación y, a diferencia de la primera, permite obtener la información buscada sobre una malla de cálculo equiespaciada y determinada al principio del análisis.

En el segundo caso no se pretende seguir cada partícula, por ello se usa una magnitud estadística para medir el desplazamiento medio de cada grupo de partículas. Esta magnitud es el coeficiente de correlación  $C$ : la posición del pico de dicho coeficiente en el plano de correlación respecto al origen de este último indica el desplazamiento medio buscado. Un ejemplo de ventanas de interrogación y del correspondiente plano de correlación se puede apreciar en la figura 3.1.3.

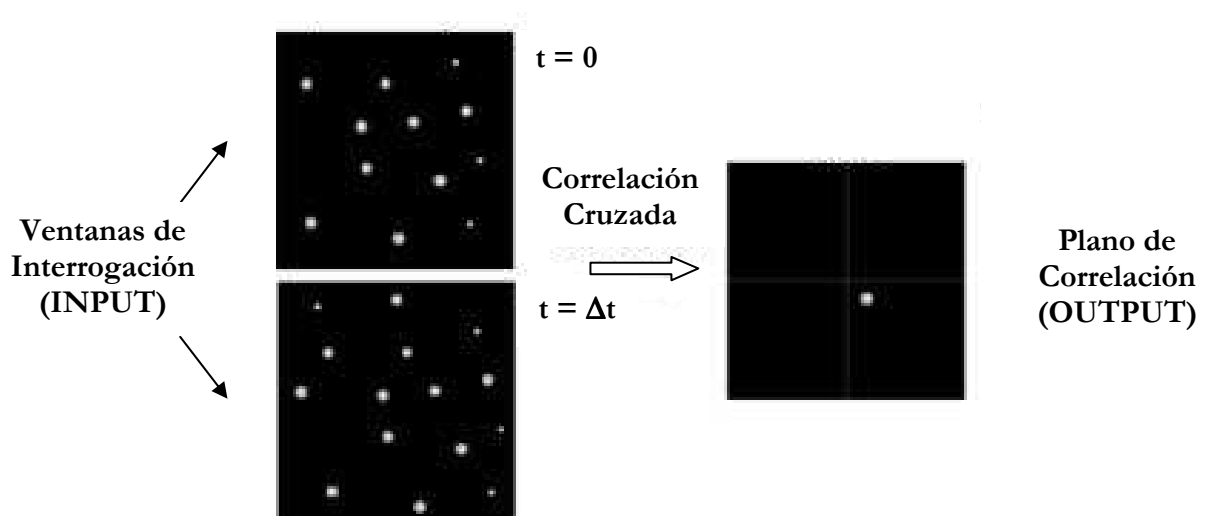


Figura 3.1.3: Ejemplo de ventanas de interrogación y plano de correlación correspondiente

## 3.2. Las técnicas de procesado

Hasta aquí se ha hablado de lo que se entiende por análisis de imagen y de cómo es posible obtener de esta el campo de desplazamientos.

Para llevar esto a la práctica, hay que tomar precauciones adicionales que aseguren una medida correcta. Se recurre a algunos pasos que permiten, a paridad de imágenes adquiridas, reducir el tiempo de cálculo y/o conseguir resultados caracterizados por un aumento de resolución espacial y precisión.

Estos pasos se traducen principalmente en tres fases.

1. La fase de *pre-procesado*, es decir la fase de tratamiento de las imágenes precedente el efectivo cálculo del campo de desplazamientos.
2. La fase de *procesado*, en la que se efectúa la estimación del campo de desplazamientos, seguida, gracias a la información sobre el tiempo entre imágenes, por el cálculo del campo de velocidad.
3. La fase de *post-procesado*, posterior al cálculo del campo fluido en si y que permite obtener magnitudes derivadas como la vorticidad.

### 3.2.1. El pre-procesado

En la fase de adquisición de imágenes no es siempre posible evitar la presencia de reflexiones de luz láser, diferencia de iluminación o cualquier imprevisto que lleve a la formación de porciones de imagen no utilizables para la medida. Todo esto puede fácilmente generar, durante el cálculo del coeficiente de correlación, unos grupos de picos secundarios que pueden inducir un error en el cálculo del desplazamiento medio en la zona examinada.

Como consecuencia de la presencia de estos picos secundarios se genera una reducción de la relación señal/ruido en el plano de correlación. Se entiende por señal/ruido la relación entre el valor del coeficiente de correlación del pico más alto dividido por el valor del mismo coeficiente en el segundo pico en los casos de señal/ruido mayor que la unidad. En caso contrario, el pico de la señal tiene una intensidad menor que el del ruido de la imagen. Ello indica la posibilidad de que el algoritmo confunda el pico debido al ruido con el pico que se obtendría en caso de que se considerara solo la señal de las partículas, proporcionando un valor incorrecto del desplazamiento buscado.

Si eso se repite en varios nodos de la malla de cálculo, se produce un aumento de porcentaje de vectores espurios (*outliers*) en el campo obtenido. En estos casos puede ser necesario recurrir a técnicas que incrementen la relación señal/ruido en el plano de correlación, a través de un preprocesado de las imágenes, que sea capaz de reducir el ruido presente en estas.

Entre las varias metodologías existentes, a continuación se mencionan algunas de las más utilizadas.

La primera de ellas se denomina de *image brightness contrast*. Se basa en el empleo de un estiramiento (stretching) lineal del campo de intensidad luminosa. Para hacer eso se fijan dos valores característicos, que se indicaran con  $A$  y  $B$ , tales que todos los valores de intensidad luminosa bajo un valor de umbral  $A$  se ponen igual a 0, mientras todos aquellos mayores del valor  $B$  se ponen igual a 255 (que es el valor máximo que puede asumir la intensidad luminosa para una imagen de 8 bits). Los valores restantes de intensidad se varían linealmente entre 0 y 255 explotando la proporción existente entre lo que había antes de la cancelación de los valores externos al intervalo  $[A, B]$  y el intervalo  $[0, 255]$ .

Esta operación induce un aumento de la diferencia existente entre el nivel de intensidad luminosa del ruido y aquello de las partículas. Como consecuencia se obtiene un incremento notable de la relación señal/ruido en el plano de la correlación, (a condición que la elección de los valores  $A$  y  $B$  se haga considerando atentamente la topología de ruido presente en las imágenes) y por lo tanto, una reducción del número de vectores espurios presentes al final del análisis (disminuye la probabilidad de confundir un pico debido al ruido con el pico debido al señal de las partículas).

Se habla de *image stretching* si se impone  $A$  igual al valor mínimo de la intensidad luminosa de la imagen y  $B$  igual al valor máximo, haciendo variar linealmente los valores restantes en el intervalo  $[0, 255]$ , y de *image sharpening* haciendo la misma variación linear pero poniendo  $A$  igual al valor medio de la intensidad luminosa de la imagen.

La limitación estas dos técnicas es que, en caso de ruido muy elevado, hay un cierto riesgo de eliminar las imágenes de muchas partículas, con una consiguiente reducción de la señal y, por lo tanto, de la información disponible. Consecuentemente este tipo de técnicas, en situaciones particulares, podría inducir una reducción de la relación señal/ruido.

Otra técnica que se puede citar, consiste en la aplicación de filtros oportunos a las imágenes PIV que sean capaces de eliminar el ruido de baja y de alta frecuencia, y al mismo tiempo, de dejar inalteradas las imágenes de partículas.

Sin embargo conviene resaltar que, acorde a la experiencia adquirida, es conveniente cuidar la fase de adquisición (sembrado, iluminación, etc.) ya que un tratamiento previo de las imágenes conlleva necesariamente una pérdida de información o bien una alteración, aunque pequeña, de la imagen del campo fluido.

La opinión de expertos en el tema y la experiencia personal de la autora, aconsejan dedicar todo el esfuerzo posible para conseguir buenas imágenes (sembrado adecuado a las medidas, homogeneidad de iluminación de la zona a medir y del sembrado en dicha área, etc.). En los experimentos de escala industrial que se presentaran en esta Tesis se pone de manifiesto que las horas de laboratorio dedicadas a la obtención de una calidad muy alta de sembrado han sido esenciales para la obtención de medidas de alta calidad científica.

También es importante considerar que el sistema de PIV avanzado LFC-PIV, central en el desarrollo de esta Tesis, ha demostrado ser menos sensible a la calidad del sembrado, como se podrá de manifiesto en los resultados obtenidos con imágenes reales, presentados en el capítulo 8 de este documento, siendo más difícil que se presente la necesidad de recurrir a técnicas de preprocesado.

### 3.2.2. El procesado de las imágenes

Hasta aquí se han expuesto las técnicas que permiten preparar las imágenes para el proceso de análisis. Este apartado se centra en el detalle de ese proceso describiendo las metodologías usadas para obtener el campo de desplazamiento y, por lo tanto, el campo de velocidad.

Para obtener el campo de desplazamientos de las imágenes adquiridas, se tiene que recurrir a la función de correlación cruzada.

El método más simple es dividir dichas imágenes en parcelas, denominadas ventanas de interrogación. Tomando de ambas imágenes de PIV las dos ventanas correspondientes a una misma localización, se calcula la función de correlación espacial entre ellas. De esta última función se obtiene el coeficiente de correlación. El pico de dicho coeficiente permite obtener el desplazamiento buscado, que será el vector que, en el plano de correlación, identifica su posición.

Una vez subdividida la imagen en ventanas de interrogación, la expresión de dicha función de correlación cruzada  $R$  es:

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{a_I} \int_{a_I} I(x, y) \cdot I'(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy \quad 3.2.1$$

Donde con  $a_I$  se indica el área de la ventana de interrogación, con  $I(x, y)$  la distribución de intensidad luminosa en la ventana relativa a la primera imagen de interrogación y con  $I'(x, y)$  aquella relativa a la segunda.

Conocida esta función, es posible calcular el coeficiente de correlación  $C$  definido como:

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{R(\Delta x, \Delta y)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad 3.2.2$$

Donde con  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  se indican las desviaciones estándar de las distribuciones de intensidad luminosa en la primera y en segunda ventana de interrogación respectivamente.

Una vez obtenido este coeficiente, que puede alcanzar como máximo un valor unidad, es posible calcular los valores de  $\Delta x$  y  $\Delta y$  que corresponden al valor máximo de  $C$ , es decir, como se ha dicho antes, las componentes del desplazamiento medio del grupo de partículas en las ventanas consideradas.

Estos conceptos se representan en figura 3.2.1, donde se muestra el plano de correlación de una pareja de ventanas de interrogación, cada una perteneciente a las imágenes consideradas, y el desplazamiento resultante. En la figura se han indicado con  $\Delta x$  y  $\Delta y$  las componentes del vector de desplazamiento en las dos direcciones coordinadas.

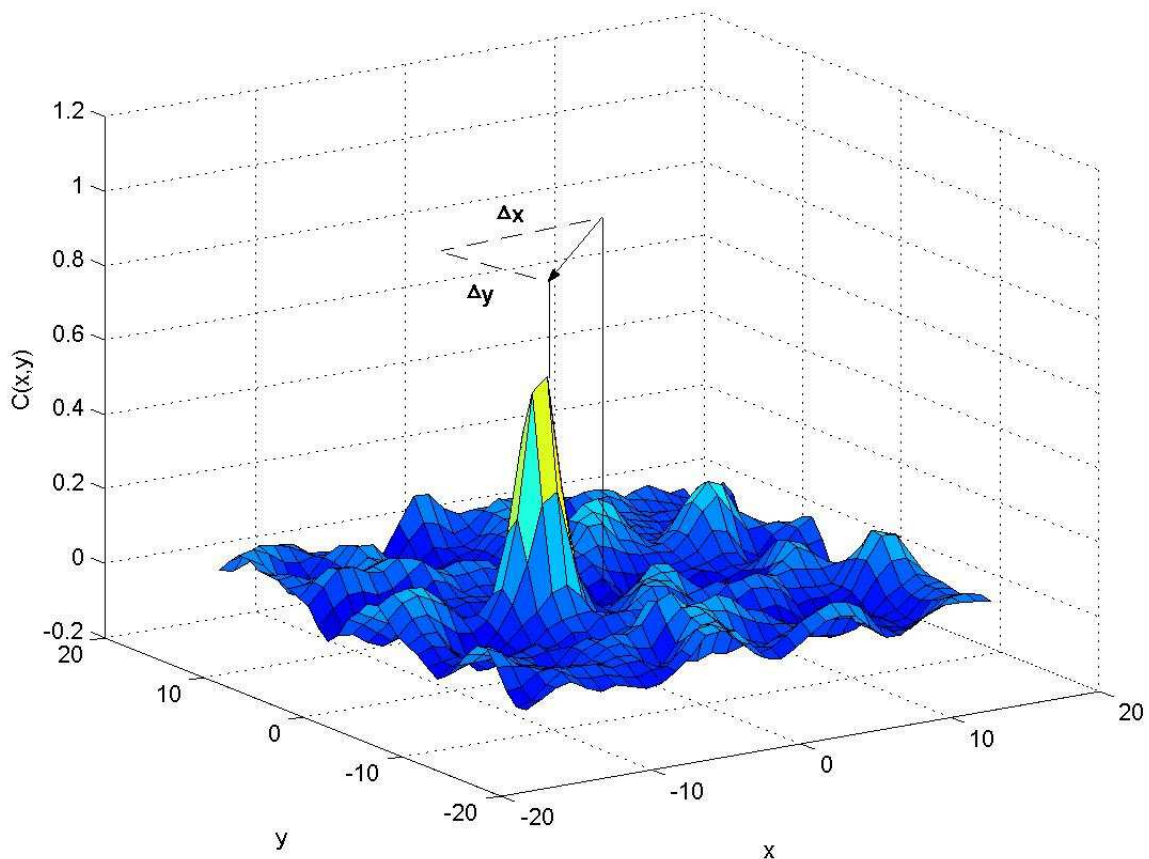


Figura 3.2.1: Coeficiente de correlación y cálculo del desplazamiento relativo (Nauri S., 2002)

### 3.2.3. La transformada rápida de Fourier o Fast Fourier Transform (FFT)

La utilización del coeficiente de correlación resultante del cálculo de la función de correlación directamente en el espacio físico (correlación directa) podría parecer la única vía, o la más correcta, a seguir para el cálculo del campo de desplazamiento. Efectivamente, desde el punto de vista teórico, éste parece constituirse actualmente en el método idóneo, aunque no el único, para obtener el coeficiente de correlación de las señales discretas.

Sin embargo conviene considerar que, para obtener un algoritmo de análisis de imágenes efectivamente funcional y utilizable en campo industrial, es necesario que sea lo más rápido posible. Por ello se intenta acelerar lo más posible el análisis (exigencia que, a veces, resulta más importante que aquella relativa a la precisión de las mediciones realizadas).

Para calcular la función de correlación cruzada es posible recurrir al teorema de Wiener-Khitchine, según el cual hay una equivalencia entre la anti-transformada de Fourier de la densidad espectral de potencia y la función de correlación de la señal considerada (la formulación de este teorema, que no se incluye en este trabajo, se puede encontrar en textos de análisis de señal comunes en sus distintas facetas y aplicaciones. Entre otros, se pueden citar: Bracewell RN, 1978, Bendat JS and Piersol AG, 1980 and 1971, Roth P, 1971 and 1970, Couch LW, 2001).

Si se supone conocida la densidad espectral de potencia ( $S$ ), se puede obtener muy rápidamente la función de correlación cruzada efectuando la anti-transformada de Fourier de dicha función.

Para calcular la densidad espectral de potencia se puede recurrir a su definición, expresable en la forma:

$$S_{12}(\nu) = I'_1(\nu) \cdot I'^*_2(\nu) \quad 3.2.3$$

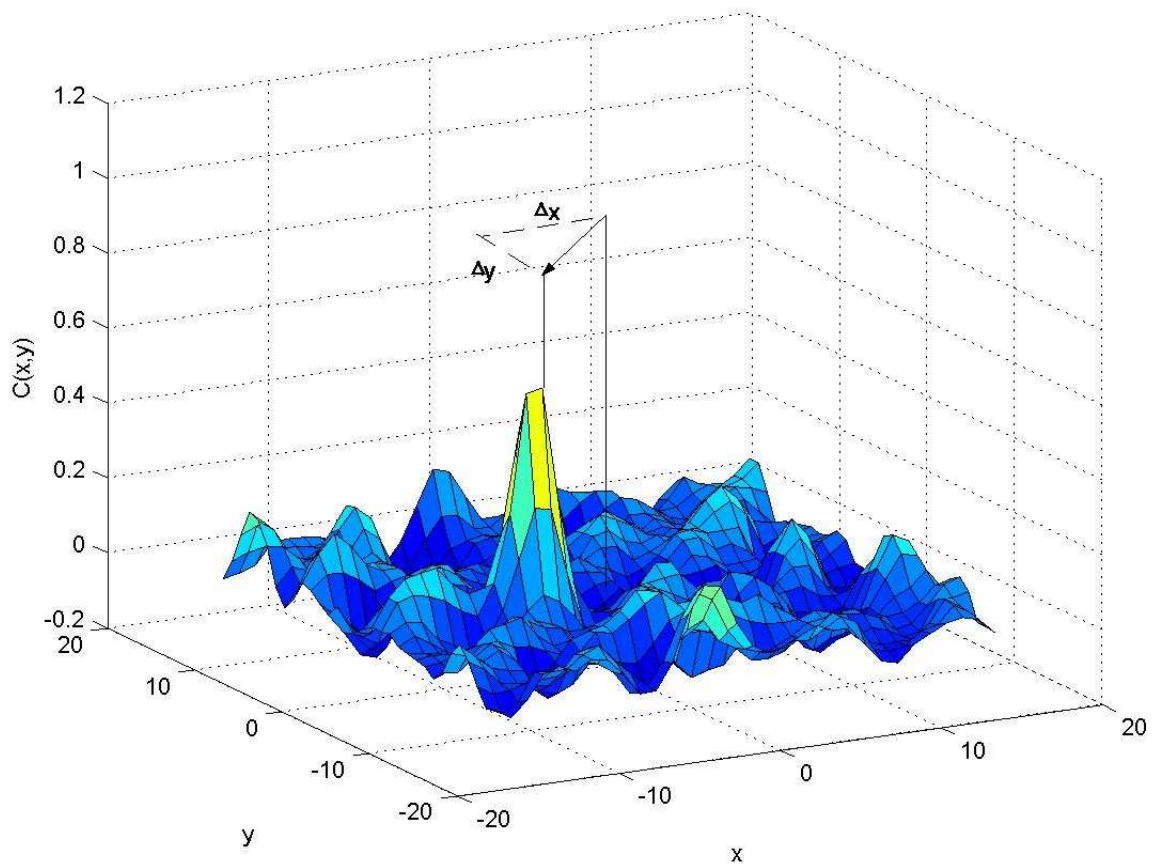
Donde con  $S_{12}(\nu)$  se ha indicado la densidad espectral de potencia, función del numero de onda  $\nu$ , con  $I_1(\nu)$  la transformada de Fourier del campo de intensidad luminosa de la ventana de interrogación relativa a la primera imagen, también función del numero de onda  $\nu$ , mientras con  $I_2^*(\nu)$  se ha indicado el conjugado de la transformada de Fourier del campo de intensidad luminosa de la ventana de interrogación relativa a la segunda imagen.

De acuerdo con eso, es posible recurrir a las trasformadas de Fourier del campo de intensidad luminosa de las ventanas de interrogación para calcular la función de correlación.

Proceder de esta manera permite una reducción notable del coste computacional exigido, en cuánto es posible obtener las trasformadas de la señal utilizando trasformadas discretas rápidas de Fourier (FFT), y la función de correlación a partir de la densidad espectral de potencia utilizando la transformada rápida inversa (IFFT).

Esta metodología permite pasar de un numero de iteraciones iguales a  $O(N^4)$  (donde  $O$  significa del orden de) en el caso que se calcule la función de correlación cruzada utilizando la definición provista en la ecuación 1.1, a un número de operaciones iguales a  $O(N^2 \cdot \log_2 N)$  si se aplica el teorema de Wiener-Khitchine.

Sin embargo, el empleo de este teorema lleva algunas desventajas. En detalle se puede observar, confrontando las figuras 3.2.1 y 3.2.2, que el empleo de la FFT para el cálculo de la función de correlación cruzada introduce un mayor ruido con respecto a lo que habría si se empleara la función de correlación directa; de esta forma se causa, por lo tanto, una reducción de la relación señal/ruido.



**Figura 3.2.2:** Coeficiente de correlación obtenido aplicando el teorema de Wiener-Khintchine (Nauri, 2002)



Tal comportamiento es debido a que la FFT trata la señal discreta como si fuese periódica, también cuando esta asunción no se corresponde con la realidad.

El tomar una ventana finita genera una discontinuidad en la señal, con escalón que la lleva a cero fuera de la ventana, que las transformadas de Fourier tratan. En el dominio de la frecuencia esta discontinuidad produce una oscilación espuria, es decir ruido, que se extiende en toda la gama de números de onda, implicando una reducción de la relación señal/ruido en el plano de correlación.

Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 3.2.2, tal reducción no es tan grande como para impedir la localización del pico de correlación (es por lo tanto posible identificar el vector de desplazamiento buscado) si se consideran las ventanas de interrogación de dimensiones suficientemente elevadas (generalmente las ventanas suelen ser de dimensiones no inferior a 16x16 píxel). Si las dimensiones son demasiado limitadas, el ruido introducido por la discontinuidad debida al FFT será elevado impidiendo la distinción entre los picos secundarios, debidos al ruido en el plano de correlación, y el pico principal, dado por la señal a medir.

En caso de estar en las condiciones para localizar el pico de correlación sin ambigüedad, el empleo de la FFT resulta particularmente favorable respecto a la correlación directa, por su mayor velocidad de cálculo.

El esquema del algoritmo a seguir durante la aplicación de FFT (figura 3.2.3) representa las operaciones características generalmente seguidas en un software comercial.

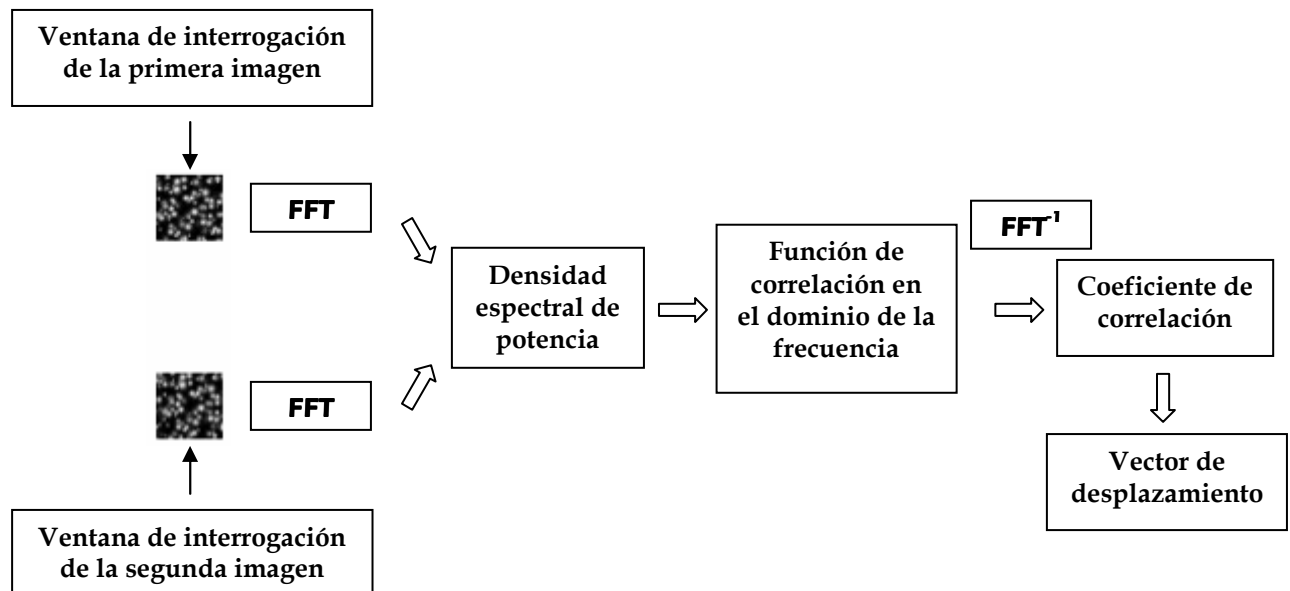


Figura 3.2.3: Esquema de cálculo del desplazamiento tramite el teorema de Wiener-Khinchine

### 3.3. Interpolación subpíxel

Hasta ahora se ha considerado suficiente, para calcular el desplazamiento buscado, localizar el pico de la función de correlación. Sin embargo, como todas las magnitudes utilizadas en un software de análisis de imágenes, también el coeficiente de correlación es una variable discreta, conocida solo en algunos puntos del plano de correlación, puntos que se identifican por coordenadas enteras en píxel. Se comprende fácilmente que la búsqueda del máximo de la función de correlación discreta en examen proporciona como resultado un valor entero en píxel para las dos componentes  $x$  e  $y$  del vector desplazamiento. Tales valores no se corresponden, en general, con la localización exacta del pico del coeficiente de correlación, sino que con los valores enteros más próximos a los que interesan.



Esto indica que, para obtener una medida lo más precisa posible, es necesario recurrir a un estudio del coeficiente de correlación en el entorno del punto buscado y utilizar funciones interpoladoras que permitan la localización del máximo, considerando tal coeficiente como una función continua. Para esta labor la función utilizada es una Gaussiana, que es la que se suele postular que aproximar mejor la forma del coeficiente de correlación. (Lourenco, 1996) Si, en efecto, se considera que la distribución de la intensidad luminosa de las partículas en una imagen se puede aproximar a una función Gaussiana, y que la correlación de esa función da como resultado siempre una función de ese tipo, se puede fácilmente comprender, por lo menos a nivel cualitativo, la razón de lo que se afirma aquí.

A continuación se explicita la expresión utilizada (Raffel et. al, 1998):

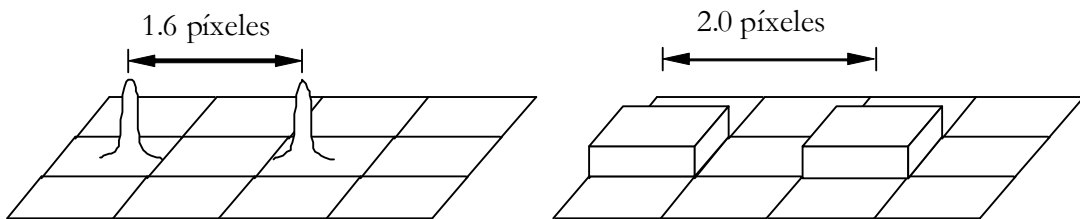
$$\begin{aligned} x_0 &= i + \frac{\ln C_{(i-1,j)} - \ln C_{(i+1,j)}}{2 \ln C_{(i-1,j)} - 4 \ln C_{(i,j)} + 2 \ln C_{(i+1,j)}} \\ y_0 &= j + \frac{\ln C_{(i,j-1)} - \ln C_{(i,j+1)}}{2 \ln C_{(i,j-1)} - 4 \ln C_{(i,j)} + 2 \ln C_{(i,j+1)}} \end{aligned} \quad 3.2.4$$

Donde, con  $x_0$  y  $y_0$  se indican las coordenadas en píxel del desplazamiento buscado, con  $i$  y  $j$  fila y columna del plano de correlación correspondientes al valor máximo de la función de correlación y con  $C$  el valor del coeficiente de correlación en los puntos con coordenadas indicadas en el subíndice.

### 3.4. Errores intrínsecos: peak y group locking

Como último apartado de este capítulo conviene comentar dos tipos de error que aparecen en el análisis de correlación descrito en las secciones anteriores. Para ello es conveniente describir el escenario en el que nos encontramos actualmente, ya que junto con el desarrollo y las mejoras de capacidades del sistema de PIV basados en la correlación local, se ha comprobado que un desplazamiento, *offset*, discreto de las ventanas de interrogación puede aumentar sensiblemente la relación señal/ruido (Westerweel et al., 1997). Por eso la mayoría de algoritmos de PIV incluyen esta posibilidad.

El offset está fijado como la parte entera del desplazamiento medio local. Esto lleva a situaciones donde el desplazamiento final a medir entre dos ventanas de interrogación está incluido en un rango de  $\pm 0.5$  píxeles. Algunos de los errores presentes introducen un *bías* (es decir una desviación sistemática) hacia desplazamientos nulos, produciendo un efecto de anclado al pico de correlación entera apreciable, conocido como *peak locking*, que reduce la precisión del sistema. La dimensión de este error en los resultados se puede establecer analizando el histograma de velocidad. Aparece como una concentración espuria de medidas correspondientes a un valor entero del desplazamiento en píxel.

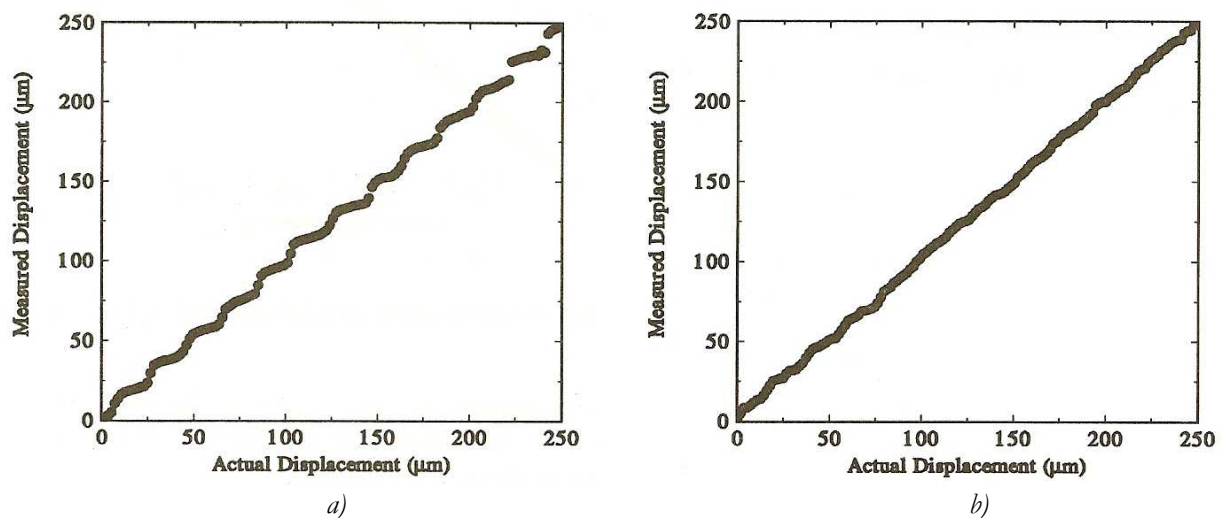


**Figura 3.4.1:** Representación del peak-locking debido a la geometría del sensor

En literatura, se han identificado y caracterizado tres distintas fuentes principales de peak locking (Lourenco, 1996; Westerweel, 1998; Nogueira et al., 2001b) a continuación se describe cada una de ellas en un subapartado. Tras dichas descripciones se define el error de anclado al grupo, denominado *group locking*.

### 3.4.1. Algoritmos con interpolación subpixel (Subpixel peak-fitting)

Una de las causas de peak locking deriva de los algoritmos de interpolación subpixel (Lourenco, 1996). Aparece típicamente cuando se utilizan algoritmos de interpolación parabólicos (Figura 3.4.2). Otra fuente de imprecisión es la distorsión del pico de correlación debida a la discretización espacial de las imágenes de partículas. La discretización reduce la información disponible sobre la forma de la partícula y posición de su centro. Dicha pérdida de información es mayor cuanto menor sea la partícula (Nogueira et. al., 2001b).



**Figura 3.4.2:** Desplazamiento actual vs. Desplazamiento medido (Lourenco, 1996). a) Interpolación parabólica. b) Interpolación Gaussiana.

### 3.4.2. Geometría del sensor

Cuando la resolución espacial del sensor no es suficiente para describir la partícula, se produce un efecto de peak locking, descrito extensivamente en Westerweel (1998).

En ese artículo se demuestra que, para evitar este efecto, el diámetro de las partículas tiene que ser mayor o igual a 2 píxeles. Por debajo de ese límite, el error de peak locking aumenta. Este efecto es más evidente cuando la relación área sensible a la luz/área del píxel sensor (*fill ratio*) es pequeña.

Cuando el diámetro de las partículas está por debajo de 1 píxel, la resolución subpixel correspondiente a una partícula desaparece (figura 3.4.1). Evidentemente, este error suele estar siempre presente, ya que la dimensión de las imágenes de las partículas puede ser difícil de variar en un experimento, y normalmente a nivel industrial es menor que los 2 píxeles necesarios para eliminar este error.

### 3.4.3. Dimensiones de la ventana de interrogación

En el caso de algoritmos PIV basados en correlación directa y en FFT, una fuente del problema de peak locking es el truncamiento de partículas en los bordes de las ventanas de interrogación (Nogueira et al. 2001b). Desplazamientos más pequeños del radio de las partículas introducen una desviación sistemática en la medida hacia cero.

En el caso de FFT PIV, el truncamiento de las partículas tiene dos efectos:

1. El pico de correlación se desplaza hacia cero.
2. Se pierde la simetría del pico.

La utilización de la correlación directa en lugar de la transformada de Fourier, pese a su elevado coste computacional, tiene la ventaja de no presentar un desplazamiento del pico de correlación. No estando presentes las distorsiones que introduce el uso de la FFT, en ausencia de ruido la posición del desplazamiento corresponde con un valor unitario del pico de correlación, obviamente correspondiente al máximo. Sin embargo, sí que se pierde la simetría del pico, con el consiguiente error en la localización del desplazamiento subpixel para una función espacial discreta.

Una descripción de esta fuente de peak locking y de las soluciones posibles está detallada en Nogueira et.al. 2001. Sin embargo, dado que los algoritmos utilizados en esta Tesis no están afectados por este error debido al truncamiento de las partículas, no se considera oportuno describir en más profundidad el tema.

### 3.4.4. Group locking

Otra importante fuente de error en las medida de PIV es el de group locking (Lecuona et. al, 2004). En la operación de correlación, el PIV desecha la información sobre la posición de las partículas dentro de la ventana de interrogación: superpone simplemente las contribuciones de las distintas correlaciones. Esto crea un desplazamiento sistemático, bías, hacia lo que a menudo se indica como el “desplazamiento más frecuente”. Esto se debe a que todas las partículas contribuyen de igual forma al pico de correlación. El error se debe a que el análisis está caracterizado por proporcionar el desplazamiento correspondiente al grupo de partículas que contribuye al pico de correlación más alto en lugar del pico correspondiente al centro de la ventana de interrogación, de ahí el nombre “group locking”.

Dos picos contribuyen al pico de correlación principal cuando:

$$s_m - s_p < R + w_p \quad 3.4.1$$

Donde  $R$  indica el radio de la zona del espacio de la correlación en la que se toman datos para la interpolación subpixel.  $w_p$  es el radio de los picos de correlación.  $s_m$  y  $s_p$  son los desplazamientos asociados a las partículas del pico principal y del pico secundario respectivamente.

En caso contrario, si el pico principal no se corresponde con el desplazamiento de partículas en el centro de la ventana de interrogación, aparece el efecto de group locking.

Es decir, cuando la dimensión de las partículas es menor que la magnitud de las diferencias de desplazamientos puede aparecer el group locking. La medida se anclará a los picos que tienen más partículas. Por ejemplo, en una senoide no se describirán bien las pendientes: la medida se anclará a los picos de correlación asociados a desplazamientos con gradientes espaciales mínimos

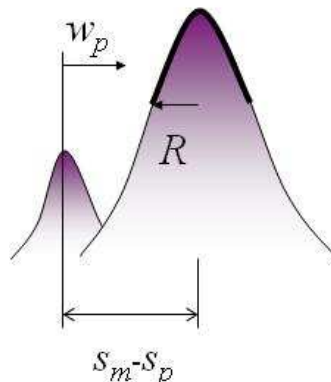


Figura 3.4.3: Representación del group-locking

## 4. NECESIDAD DE RESOLUCIÓN, GRADIENTES Y ROBUSTEZ: TENDENCIAS ACTUALES

### 4.1. Límites físicos de resolución espacial en PIV con métodos iterativos

Uno de los aspectos más relevantes a la hora de medir con PIV es la capacidad de resolución del algoritmo. En este aspecto, cuando se utilizan métodos iterativos de pasos múltiples, *multipass*, avanzados como el *multigrid* que se describirá más adelante en la sección 4.2 (Soria 1996, Scarano 2001, Scarano y Riethmuller 2000 entre otros), dos de los conceptos importantes a analizar son el efecto limitador de la ventana de interrogación y el del de muestreo de la señal a medir.

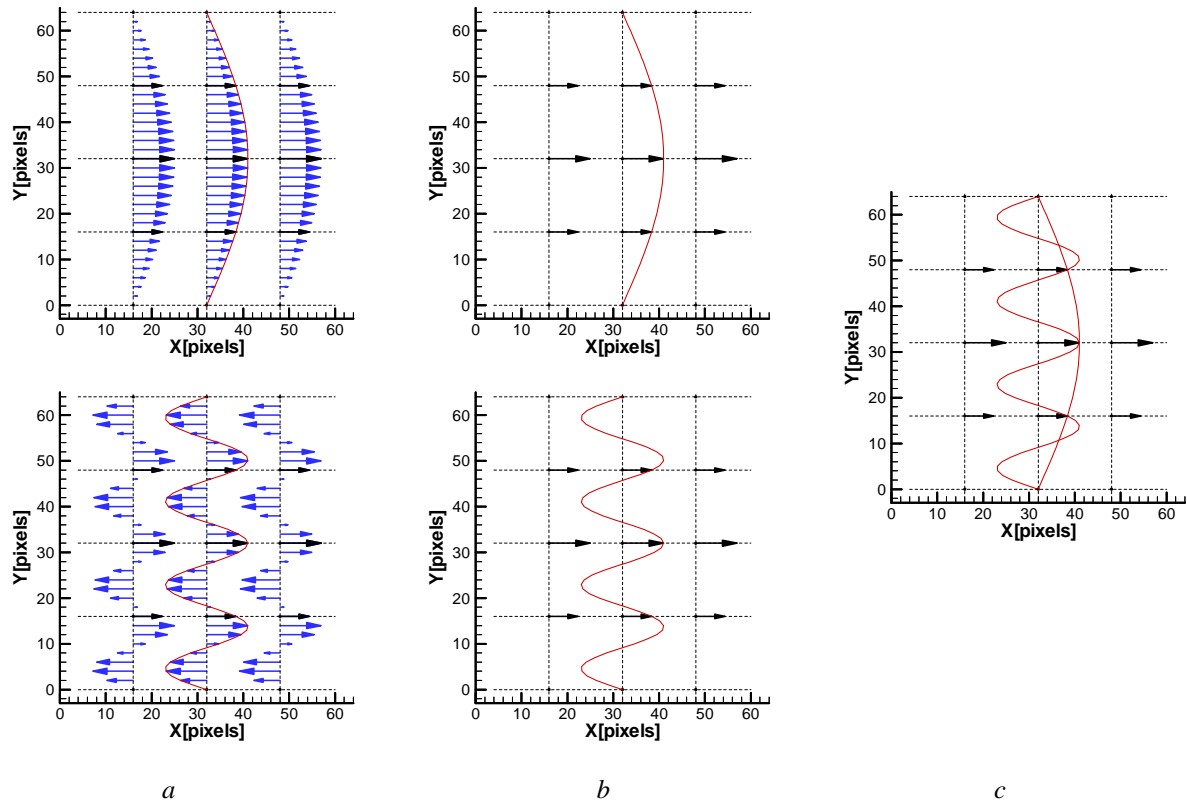
#### 4.1.1. El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon

Cuando se analiza una señal, se suele reconstruir a través de un muestreo periódico, es decir se toman medidas de la misma a intervalos iguales. Es evidente que si la frecuencia espacial de muestreo es muy baja, es decir medidas demasiado espaciadas, se perderán “detalles” de la señal original. La figura 4.1.1, ayuda a explicar uno de los problemas que conlleva un muestreo insuficiente. Los vectores negros representan los puntos medidos, mientras en rojo se representa la señal a medir. Se puede ver como los vectores negros son comunes tanto al caso presentado en la parte superior de la figura como al de la parte inferior. Es decir, para la frecuencia de muestreo seleccionada, la señal de la parte superior es una aliada de la señal de la parte inferior. Este efecto se denomina en inglés *aliasing*. Estos idénticos outputs de señales distintas evidencian la imposibilidad de recuperar una información sobre el campo a medir, ya que no hay forma, una vez seleccionada la frecuencia de muestreo, de discriminar de cual de las dos longitudes de onda proviene ese resultado.

El criterio de Nyquist-Shannon (Nyquist 1928, Shannon 1949) establece que la frecuencia máxima que no presenta aliasing con ninguna inferior corresponde a la mitad de la frecuencia de muestreo.

En PIV, se pueden evidenciar dos muestreos espaciales en los que hay que tener en cuenta este concepto:

- Muestreo del campo fluido por medio del sembrado. Las partículas que lo constituye, proporcionaran una información sobre el campo fluido en los puntos donde aparezca su imagen, es decir de una forma discontinua. En este caso la distancia entre partículas no es regular, pero podemos apoyarnos en el teorema de Nyquist-Shannon para estimar que la longitud de onda mínima que se pueda resolver será del orden de  $\lambda_m \approx 2\delta$ , donde  $\delta$  indica la distancia media entre partículas en una dada imagen de PIV.
- Muestreo de un campo fluido al seleccionar la distancia entre ventanas de interrogación, y por consiguiente, entre vectores que resultan del procesado con PIV. La longitud de onda mínima que se pueda resolver sin aliasing estará limitada por dicha distancia entre vectores,  $\Delta$ , fijando  $\lambda_m = 2\Delta$ . En el caso de algoritmos *multipass*, la información de longitudes de ondas pequeñas sobrevive a través de las iteraciones dentro de las imágenes deformadas, pero la información de los campos vectoriales, incluida la que se dé como resultado final del último, presentan la limitación comentada.



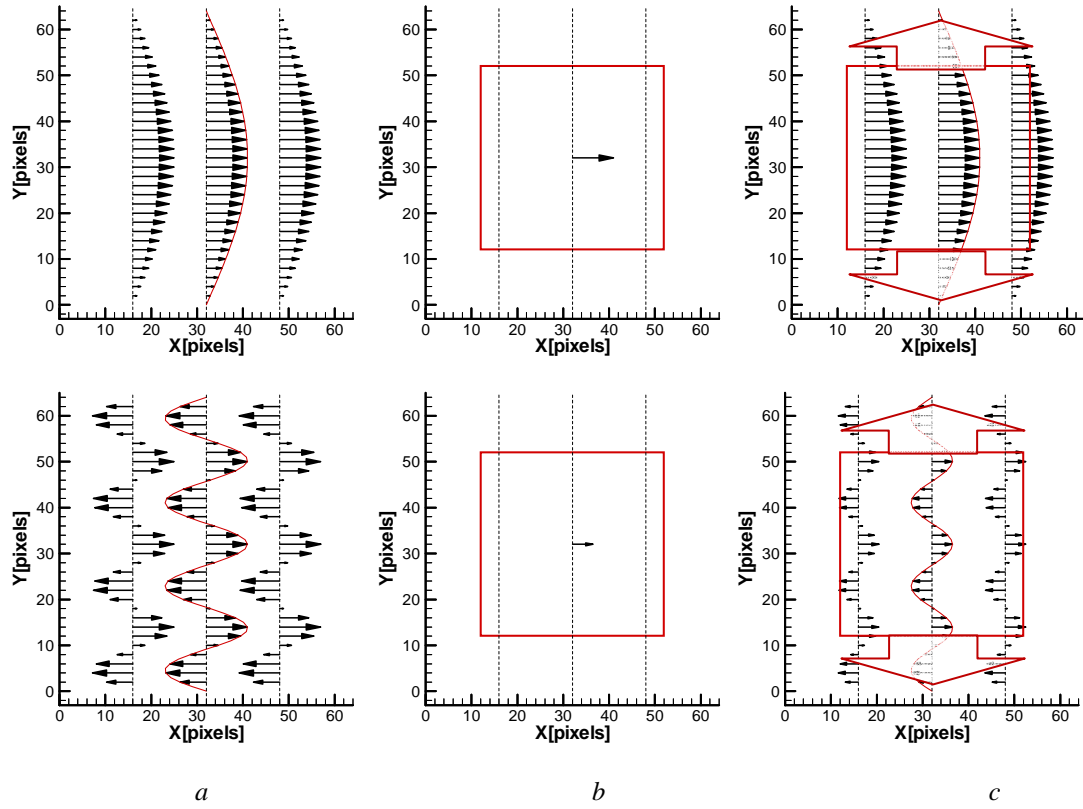
**Figure 4.1.1:** Ejemplo de muestreo de dos frecuencias espaciales aliadas. *a)* Campo vectorial a muestrear. *b)* Muestreo del campo vectorial anterior con una distancia de muestreo de 16 píxeles. *c)* Superposición de los dos casos. (Nogueira et. al. 2005).

#### 4.1.2. Media simple y media móvil

El efecto limitador de la ventana de interrogación en cuanto a resolución espacial presenta peculiaridades que no siempre están bien documentadas. En este apartado se comienza por hacer consideraciones sobre promedios locales para posteriormente extenderlas, en otros apartados, a la compleja realidad de la ventana de interrogación en PIV.

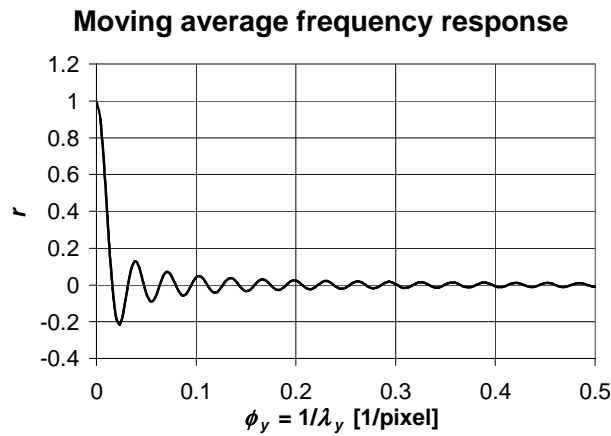
La media simple sobre una determinada región (por ejemplo una ventana de interrogación) produce como resultado un único valor, sin detalles sobre las variaciones locales (figura 4.1.2a).

En el caso de la media móvil, al proporcionar valores adyacentes, si se aprecian variaciones locales. Cuando a una frecuencia espacial se le aplica una media móvil, el resultado presenta la misma frecuencia, por muy pequeña que sea la longitud de onda  $\lambda$ , siempre que el muestreo sea suficiente (Figura 4.1.2b). En cuanto a la amplitud de la señal, la relación de amplitudes entre la señal de entrada y la de salida es conocida en función de la frecuencia espacial  $\phi$  (figura 4.1.3 para el caso unidimensional). Esta función se conoce como respuesta amplitud-frecuencia o simplemente como respuesta en frecuencia  $r$  de la media móvil. En definitiva, la aplicación de la media móvil a una señal de una frecuencia determinada no genera pérdida de información a priori.



**Figure 4.1.2:** Ejemplo de procesos sobre campos vectorial con una sola armónica. **a)** Campos vectoriales. **b)** Media. **c)** Media Móvil. Los cuadrados grandes indican la dimensión de la ventana de interrogación. Las flechas grandes indican el desplazamiento de la ventana de media móvil. (Nogueira et. al. 2005)

La situación es algo más compleja ante una señal genérica que contenga simultáneamente varias frecuencias espaciales, pero, la media móvil es un operador lineal. Consecuentemente, si la señal de salida de la media móvil se descompusiera en sus frecuencias espaciales, la señal de entrada se podría reconstruir completamente, gracias al conocimiento de la respuesta en frecuencia  $r$ , a excepción de las zonas donde  $r = 0$ . Consecuentemente, salvo para puntos singulares, la media móvil no produce una pérdida de información irrecuperable cuando  $\lambda < W_s$  (donde  $W_s$  es la dimensión de la ventana de interrogación).

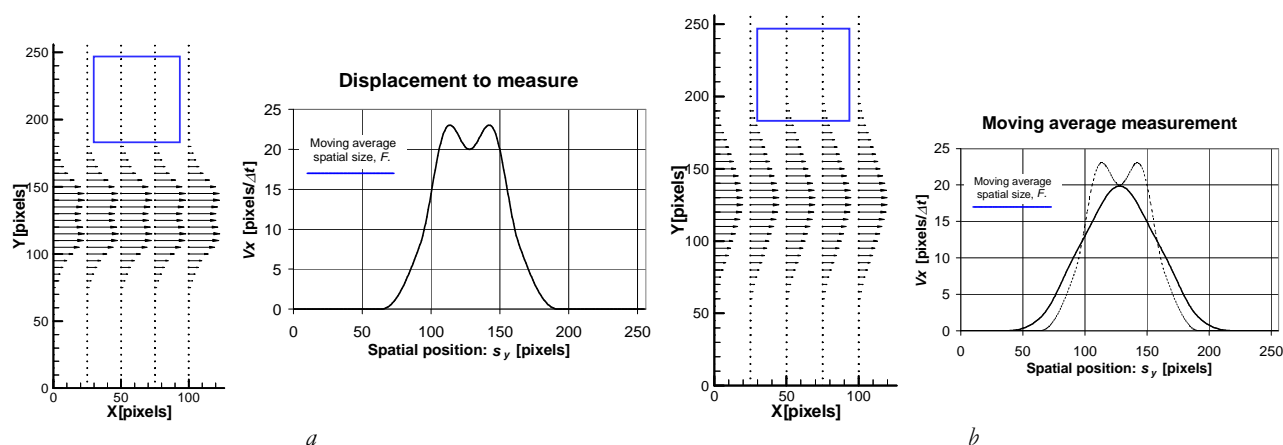


**Figura 4.1.3:** Respuesta en frecuencia de una media móvil para una ventana de interrogación  $W_s = 63$  píxeles. Para otras dimensiones de la ventana los valores nulos están localizados en  $\lambda_y = i \cdot W_s$ , siendo  $i$  un entero positivo (Nogueira et. al. 2005).

### 4.1.3. Recuperación de la información para $\lambda < W_s$ en el caso de procesos no iterativos

La afirmación del apartado anterior sobre la no existencia de pérdida de información intrínseca al proceso de media móvil está condicionada a la linealidad de la operación. En este apartado se explica este concepto por medio de un ejemplo para poder ampliar el razonamiento a una medida de PIV y razonar sobre la posibilidad o no de recuperar la información de la señal de entrada en un proceso no iterativo.

En la figura 4.1.4a se representa el campo vectorial que se usa como señal de entrada en el ejemplo mencionado. Al aplicar un sistema de medida que presente la respuesta de una media móvil que abarque un área como la representada por el cuadrado azul, se obtiene una señal de salida como la representada por la figura 4.1.4b. Este campo vectorial de salida presenta diferencias respecto a la señal de entrada. La figura 4.1.5 muestra los pasos a seguir para recuperar la información contenida y, de alguna forma, perdida durante el proceso de media móvil, tal y como se explicó en el apartado anterior. Estos pasos permiten recuperar, tras la operación de media móvil, suficiente información para llegar a una medida del desplazamiento, con un error asociado  $< 2.5\%$ , para  $\lambda > 8$  pixeles, en el caso en examen.



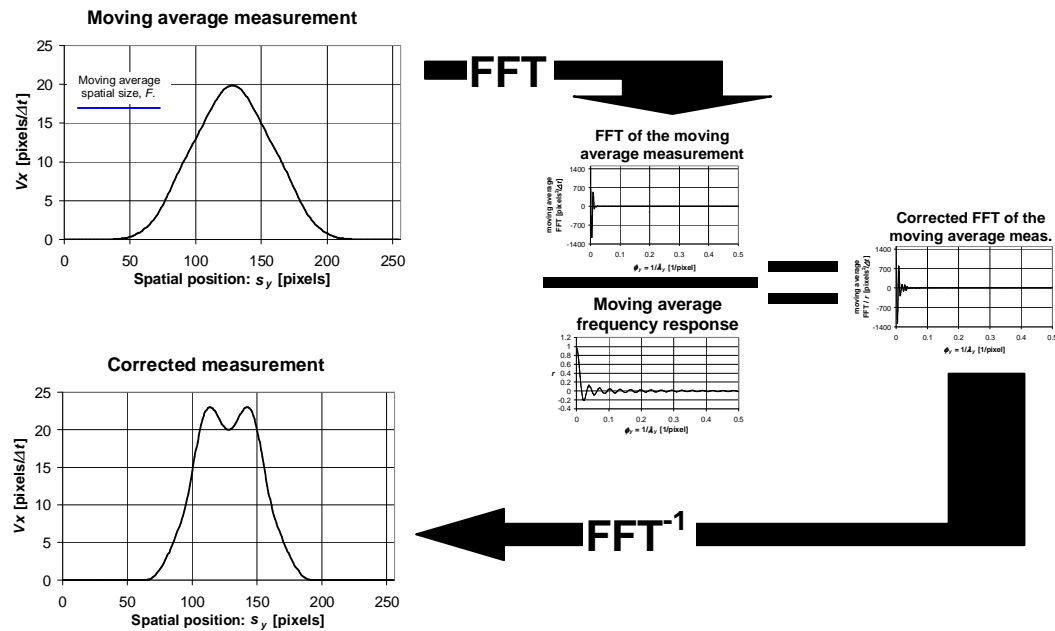
**Figura 4.1.4:** **a)** Campo vectorial a medir donde se indica la dimensión de la ventana de interrogación asociada al proceso (*cuadrado azul*). **b)** Campo vectorial obtenido al aplicar un sistema de medida con la respuesta de una media móvil al caso *a* (Nogueira et. al. 2005).

En definitiva, como ya se ha explicado anteriormente, el proceso a seguir consiste en dividir la amplitud asociada a cada longitud de onda por su respuesta en frecuencia correspondiente y aplicar una transformada de Fourier inversa a los valores obtenidos. El resultado muestra que, aún utilizando la media móvil es posible reconstruir fielmente la función de origen. Eso indica que la información sobre la función original está contenida dentro del resultado de la misma media móvil y puede ser recuperada, cosa que no se puede hacer en el caso de aliasing asociado al límite de Nyquist.

Lo expuesto hasta aquí, indica que la dimensión de la ventana de interrogación no constituye necesariamente un límite de resolución. Grandes ventanas de interrogación no implican, por sí mismas, una pérdida de información para longitudes de onda pequeñas. La pérdida de información ha de asociarse a otros factores. En el caso por ejemplo de una correlación de PIV, puede haber dicha pérdida en el cálculo del desplazamiento, siendo la operación no lineal (Nogueira et al. 2002; Lecuona et al. 2004). Como consecuencia, la respuesta en frecuencia de un sistema de PIV no sería simple de describir ni su información fácil de recuperar. En la sección 4.3 se describe la técnica propuesta por Nogueira et al. (1999), para recuperar la información de las distintas longitudes de



onda de una forma iterativa que no requiera el conocimiento de la función de respuesta en frecuencia,  $r$ .

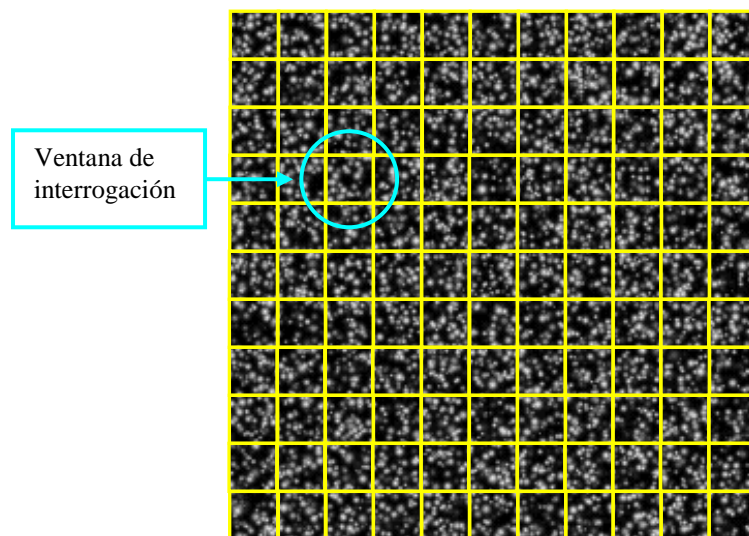


**Figura 4.1.5:** Pasos a seguir para la recuperación de la información contenida y perdida durante el proceso de media móvil (Nogueira et. al. 2005).

## 4.2. El offset de las ventanas de interrogación y el método multigríd

Antes de entrar en el detalle de las técnicas iterativas avanzadas, es preciso indicar algunos conceptos sobre el offset de las ventanas de interrogación y del método multigríd. A continuación, se comienza por definir con más detalle lo que se entiende con malla de medida.

Como se ha dicho en el capítulo 3, en principio, se divide la imagen en ventanas de interrogación. En la figura 4.2.1 se puede ver una imagen dividida en ventanas de 32x32 píxel sin superposición.

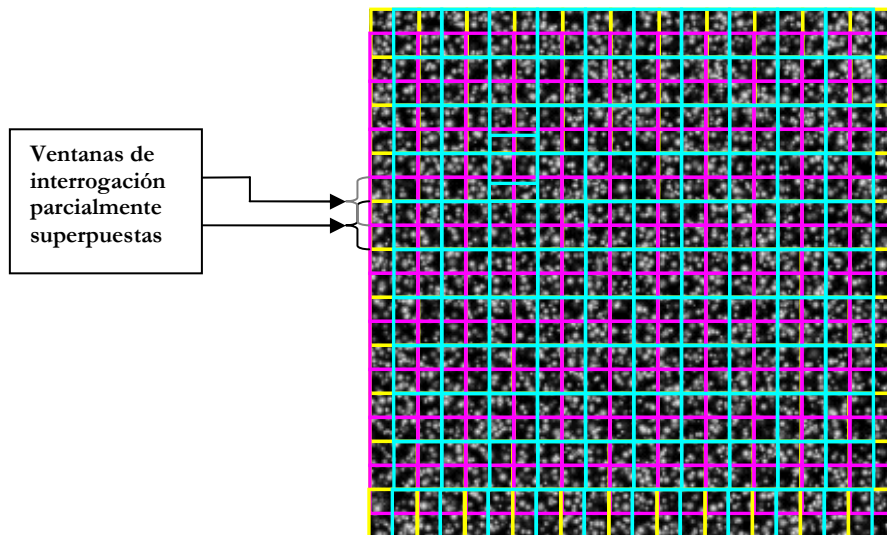


**Figura 4.2.1:** Subdivisión de la imagen en ventanas de interrogación sin superposición



La malla de medida que procede de esta división consiste en un grupo de puntos (nodos) donde se ubica el vector de desplazamiento medido. Los nodos coinciden generalmente con los puntos centrales de cada ventana de interrogación y resultan equidistantes.

A menudo es deseable tener medidas sobre una malla muy detallada. Si se emplea la disposición de las ventanas descrita en figura 4.2.1, puede alcanzarse una dimensión demasiado pequeña de cada ventana donde la relación señal/ruido en el plano de correlación sería demasiado baja.

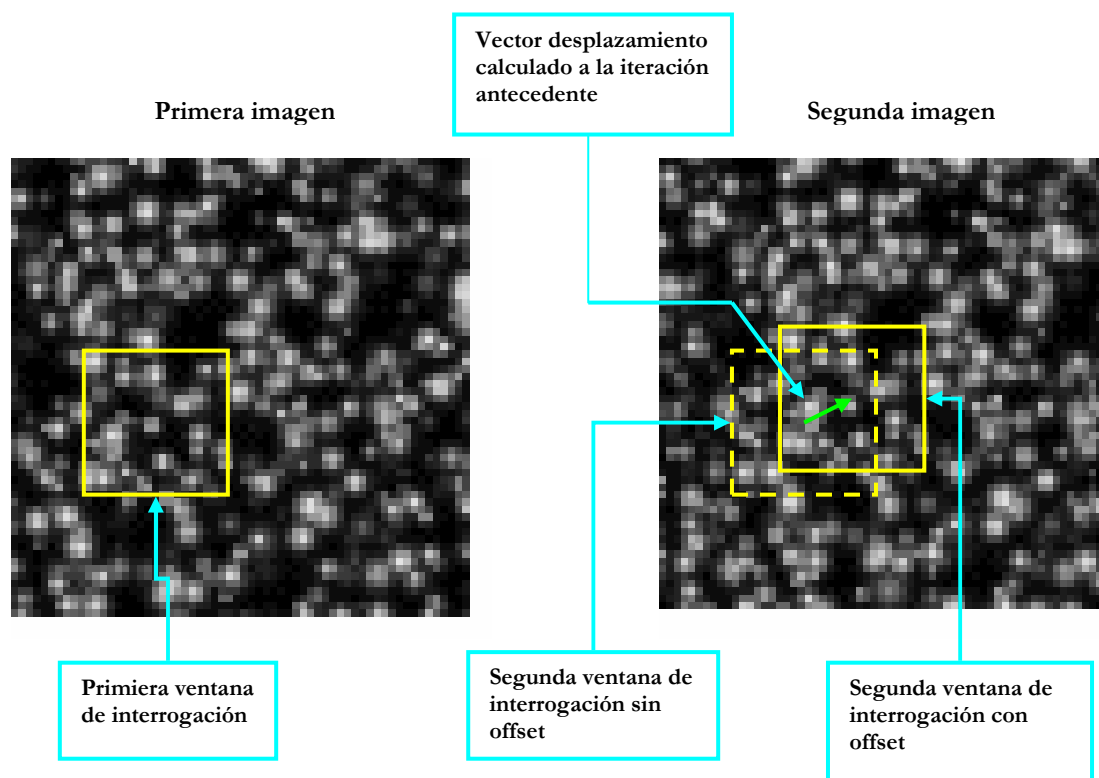


**Figura 4.2.2:** Subdivisión de la imagen en ventanas de interrogación con superposición del 50%

Se puede entonces recurrir a una superposición parcial de las ventanas, entendiendo por esto la presencia en cada ventana de una zona de la imagen ya presente en una porción de aquellas adyacentes. Se suele definir el grado de superposición o solape por el porcentaje de zona superpuesta. El ejemplo de figura 4.2.2 corresponde a una superposición del 50%.

En el capítulo 3, para un sistema convencional de PIV se asume, en concordancia con la malla de medida definida anteriormente, que el cálculo del campo de desplazamientos se puede realizar simplemente subdividiendo la imagen de salida en ventanas de interrogación (con o sin superposición), calculando para cada ventana el coeficiente de correlación y localizando la posición del pico. Sin embargo, en el estudio del error en el análisis de las imágenes en función del módulo del vector de desplazamiento calculado (Westerweel 1997), se ha evidenciado que un desplazamiento de valor elevado induce un error mayor que aquello relativo a un desplazamiento de suficientemente reducido. En particular, se ha observado que los desplazamientos con módulos menores de 0,5 píxel permiten una reducción del error proporcional a la magnitud medida.

Para poder aprovechar esta reducción es conveniente recurrir a un procedimiento iterativo para el cálculo de la magnitud buscada que, basado en el conocimiento de la medida en iteraciones previas, permita obtener en la última iteración un desplazamiento a medir con modulo inferior a 0,5 píxel.



**Figura 4.2.3:** Subdivisión de la imagen en ventanas de interrogación con y sin offset entre la primera y segunda imagen.

Una técnica que permite llegar a este resultado para una amplia gama de flujos es la que aplica un desplazamiento, denominado *offset*, a las ventanas de interrogación.

Esta consiste (si se considera un esquema a las diferencias finitas progresivas y offset discreto) en un procedimiento iterativo caracterizado por un cálculo preliminar del vector de desplazamiento en el nodo considerado, realizado con la metodología convencional descrita en el capítulo 3. En una segunda iteración, para la segunda ventana de interrogación, se usa una traslación igual a la porción entera del modulo del desplazamiento previamente calculado, en la dirección que haya definido la primera iteración. Un esquema de esta operación se puede ver en figura 4.2.3. Tras estos dos pasos se repiten las mismas operaciones en manera iterativa hasta que la diferencia existente entre los desplazamientos calculados entre dos iteraciones sucesivas es inferior a 1 píxel.

En lugar de desplazar sólo la segunda ventana de interrogación, esta técnica básica suele optimizarse desplazando las dos ventanas de interrogación, correspondientes a la primera y segunda imagen de PIV, en direcciones opuestas. La ventaja de esta técnica es que, generalmente, el vector obtenido corresponde con mayor exactitud la localización del nodo de la malla de medida en estudio.

Esta técnica permite obtener desplazamientos inferiores o iguales a 0,5 píxel, con consiguiente reducción del error que se ha descrito antes. Adicionalmente, la estructura iterativa permite realizar otras modificaciones a lo largo de la medida con la intención de optimizarla. Estas modificaciones afectan a la forma en la que se emplea la malla de medida definida anteriormente por lo que son generalmente denominados “métodos multigrad” (Soria 1996, Scarano y Riethmuller 2000 entre otros).

Los métodos multigrad constan, además de la aplicación del método del offset de las ventanas de interrogación, de una sucesiva reducción de la dimensión de las mismas y de la distancia de los nodos de la malla de medida a lo largo de las iteraciones de la medida.

En principio se calcula el campo de desplazamiento con ventanas de una dimensión suficientemente grande (en este trabajo se parte de un tamaño de 64 x 64 píxeles) para obtener una

estimación cualitativa de las magnitudes buscadas en una malla de cálculo grosera y sin demasiadas limitaciones sobre la entidad del desplazamiento a medir. Siendo el tamaño grande, las magnitudes estarán promediadas en amplias zonas del campo y consecuentemente no presentarán gran precisión. A cambio, la medida es robusta y presentará pocos vectores anclados a picos de correlación erróneos (*outliers*).

Después se aplica el método del offset en una malla más fina, y se repiten estas operaciones en ventanas más pequeñas hasta que se alcance el tamaño fijado al principio del análisis (claramente el tamaño de las ventanas en la última malla de cálculo tiene que ser bastante grande para garantizar la presencia de un número suficiente de partículas que proporcionen una relación señal/ruido aceptable).

Una modificación adicional a los sistemas multigrad descritos es la de incluir una deformación de las imágenes acorde al desplazamiento estimado (Huang et. al. 1993a y b, Jambunathan et.al. 1995). Esta deformación se aplica sobre las imágenes iniciales proporcionando imágenes corregidas en cada iteración sobre las que medir el desplazamiento restante hasta llegar a dos imágenes donde, idealmente, todas las partículas coinciden. Al incluir esta deformación, no es necesario añadir offset de la ventana de interrogación. Las ventajas de esta deformación es su naturaleza subpixel que reduce algunos problemas de peak-locking (Nogueira et al. 2001b) y la reducción de gradientes espaciales a medir que se obtiene al avanzar las iteraciones. La desventaja es la posible pérdida de calidad de la imagen al deformarla (Astarita y Cardone 2005)

El sistema comercial de Multigrad que se usa en el capítulo 7 de esta Tesis para comparaciones de actuaciones pertenece a este último tipo de algoritmos. Como se verá en el siguiente apartado, los algoritmos que utilizan deformación del patrón de partículas sufren de inestabilidades del sistema que, en el software comercial, se resuelven utilizando una operación de suavizado espacial *smoothing* (es decir una media móvil) sobre una malla 3 por 3 (Wieneke, 2001).

### **4.3. Recuperación de información para $\lambda < W_s$ : LFC-PIV. Descripción de la técnica**

En el apartado 4.1.3, se ha visto como una media móvil con ventana de interrogación de grandes dimensiones es capaz de preservar la información contenida en longitudes de ondas pequeñas, aunque con una cierta atenuación. A continuación se describen las peculiaridades y los pasos a seguir para recuperar esa información en el caso de PIV donde en vez del sencillo procedimiento de la figura 4.1.5, se ha de recurrir a un proceso iterativo (Nogueira et al., 2005) debido a la presencia de procesos no lineales que imposibilitan una respuesta en frecuencia unívoca. Los pasos básicos en un sistema iterativo se presentan en la figura 4.3.1 y corresponden a:

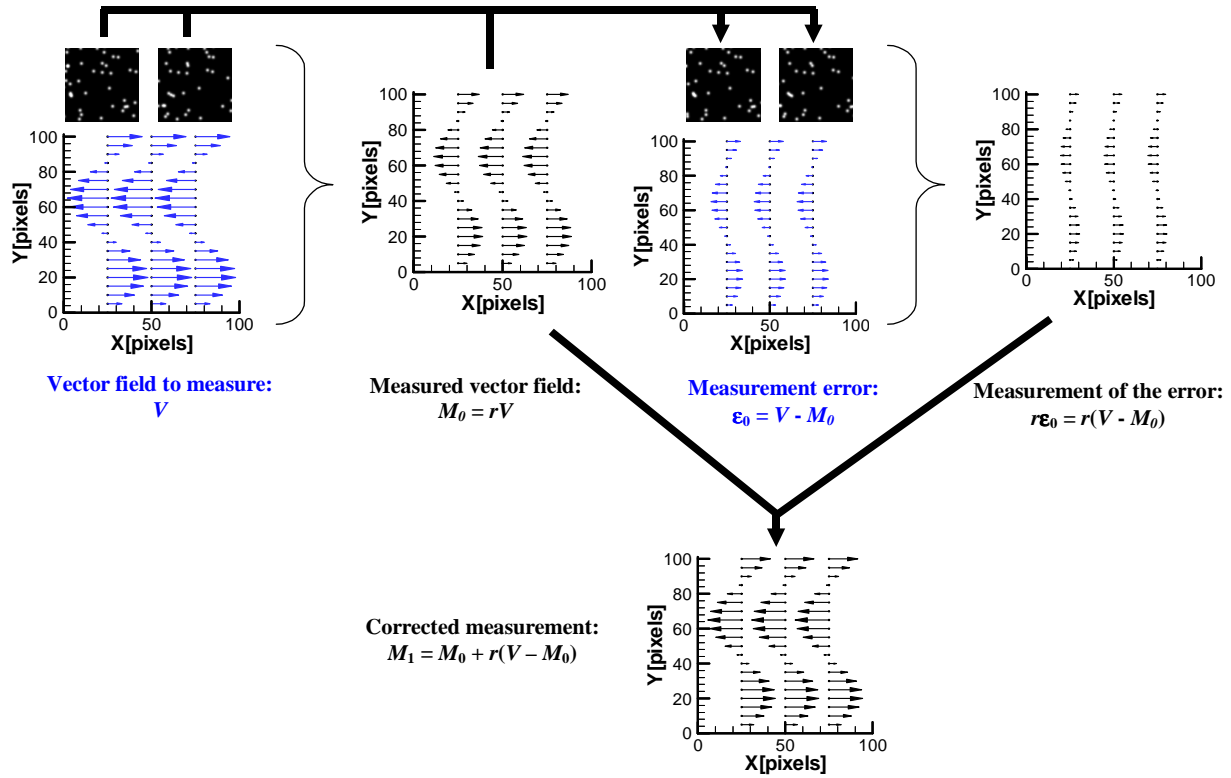
1. Obtener la medida  $M_0$  del campo de desplazamientos  $V$  analizando las imágenes de partículas.
2. Restar la medida  $M_0$  al desplazamiento real  $V$  para obtener el error asociado. Esta operación se puede efectuar deformando las imágenes originales según el desplazamiento que la medida  $M_0$  prescribe. El resultado se traduce en una nueva pareja de imágenes  $\varepsilon_0$ . Conviene resaltar que la información resultante, que contiene el error asociado a la medida, no está directamente disponible, pero está contenido en la nueva pareja de imágenes.
3. Medir este error utilizando la nueva pareja de imágenes por medio de un proceso de PIV. El resultado de esta medida será el  $r\varepsilon_0$  como se indica en la figura.
4. Corregir la medida obtenida en el primer paso  $M_0$ , añadiéndole la medida del error  $r\varepsilon_0$  del paso 3. Siendo el resultado  $M_1$ .
5. Repetir los pasos 2-4 hasta que el algoritmo converja.

La figura 4.3.1 particulariza este procedimiento para una determinada longitud de onda con respuesta en frecuencia  $r$ . En la  $n$ -ésima iteración, la medida corregida será:

$$M_n = M_{n-1} + r(V - M_{n-1}) \Rightarrow M_n = V - V(1 - r)^n$$

Se observe que la convergencia del algoritmo se alcanza solo si  $2 > r > 0$ .

Para las frecuencias con  $r < 0$  se produce inestabilidad en el algoritmo. Como se puede ver en la figura 4.1.3, donde se representa la respuesta en frecuencia de una media móvil, la convergencia depende de la frecuencia de la señal a medir. Consecuentemente, para evitar la inestabilidad del algoritmo es necesario evitar las frecuencias inestables. Para ello, se puede limitar la frecuencia espacial de muestreo para, usando el límite de Nyquist, evitar que las frecuencias inestables se puedan describir, pero esto limita la resolución espacial. Otra solución consiste en utilizar smoothing como se comentó en el apartado anterior. Esto también limita la resolución como se describe en detalle en el capítulo 6. Una tercera solución es utilizar una función de ponderación que cambie de una forma oportuna la función  $r$ . Esta solución no limita la resolución espacial a priori. La función de ponderación ha de originar una respuesta en frecuencia contenida entre 0 y 2 como se ha especificado anteriormente.



**Figura 4.3.1:** Esquema del procedimiento iterativo de corrección de la medida (Nogueira et. al. 2005). La información en azul indica la información contenida en una pareja de imágenes de PIV (i.e. no disponible directamente).

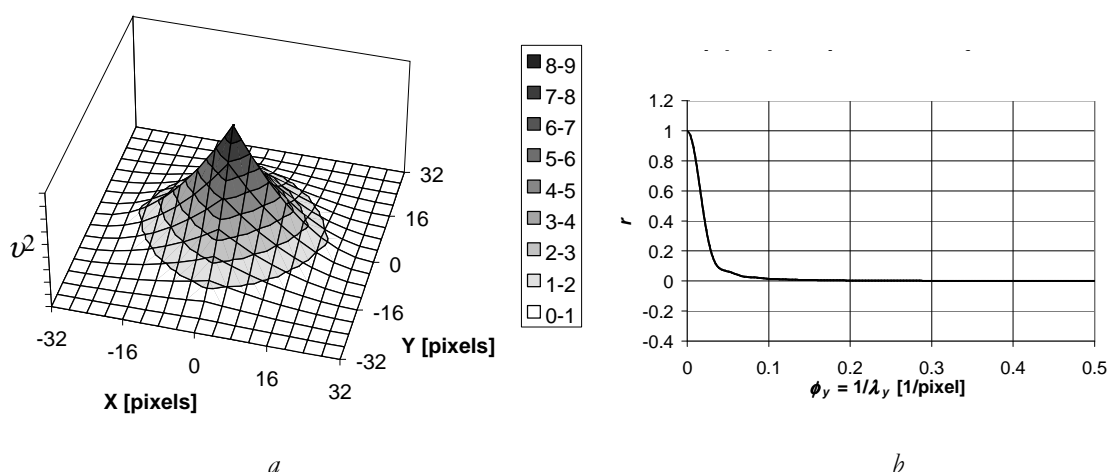
Un ejemplo de función de ponderación que satisface este criterio es la función  $v^2$  (fig. 4.3.1a) de la ecuación 4.3.1 y cuya respuesta en frecuencia (ecuación 4.3.2) en el caso de una ventana de interrogación de 63 píxeles, se representa en figura 4.3.1b.

$$v^2 = 3 \left( 4 \left| \frac{y}{F} \right|^2 - 4 \left| \frac{y}{F} \right| + 1 \right); \quad 4.3.1$$

$$r = \frac{6}{\pi^2 \phi_y^2 F^2} \left( 1 - \frac{\sin(\pi \phi_y F)}{\pi \phi_y F} \right) \quad 4.3.2$$

El algoritmo presentado por Nogueira et al. (1999 y 2001a) y usado en la combinación de técnicas del capítulo 6 de esta Tesis, realiza el cálculo del campo de desplazamientos empleando la deformación de imágenes iniciales comentada (Jambunathan et.al., 1995, Huang et. al. 1993a y b). Esta deformación se basa en el campo de desplazamientos calculado de manera iterativa con la función de ponderación previamente indicada (expresión 4.3.1).

Como en el caso multigrad, la deformación permite la reducción de las diferencias existentes entre las dos imágenes analizadas debida a la presencia de gradientes de velocidad. De ese modo se aumenta el coeficiente de correlación en correspondencia a cada ventana de interrogación y, consecuentemente, aumenta robustez y la precisión de las medidas efectuadas. Adicionalmente, su capacidad de alcanzar una resolución espacial notablemente elevada sin la necesidad de reducción del tamaño de las ventanas de interrogación también redundan en la robustez del sistema.



**Figura 4.3.1:** *a)* Ponderación de la información en el interior de la ventana de interrogación  $W_s = 63$  pixeles según la expresión 4.3.1. *b)* Respuesta en frecuencia de la media móvil (con  $W_s = 63$  pixeles) ponderada con función descrita por la expresión 4.3.2. (Adaptado de Nogueira et. al. 2005).

Dado que esta técnica se empleará en el capítulo 6, a continuación se particularizan algunos de los detalles de su implementación.

Adicionalmente a la medida de los desplazamientos con ventanas de interrogación de gran tamaño, se usan otras ventanas menores para una labor distinta: la comprobación de la calidad de la medida (Nogueira et. al, 2001a). La dimensión de estas ventanas corresponde al doble de la distancia existente entre cada nodo de la malla de cálculo lo que implica una superposición entre ellas del 50%. A continuación se efectúa el cálculo de los coeficientes de correlación de desplazamiento nulo en cada una de estas ventanas. Estos valores se almacenan en una matriz que se utilizará para decidir en qué nodos el cálculo de los vectores de desplazamiento mejora la medida. Para ello se sigue la evolución de dichos coeficientes a lo largo de las distintas iteraciones.

Para la medida en sí de los desplazamientos se emplean ventanas de interrogación de mayor tamaño, caracterizadas por una superposición mayor de la que se había utilizado para el cálculo de la matriz de los coeficientes de control de mejora de la medida. Con estas ventanas es con las que se efectuar la estimación del campo de desplazamientos existente entre las imágenes. En este análisis la única diferencia con las técnicas usuales de análisis de imágenes de PIV es la aplicación de la función de ponderación de la expresión 4.3.1. Como se ha comentado su misión es impedir la inestabilidad que aparecería en su ausencia. La función de peso se caracteriza por no tener inversión de fase en su respuesta en frecuencia. El efecto que se persigue es evitar medidas con errores en la dirección del flujo estudiado y la consecuente divergencia del algoritmo.

Después de haber obtenido esta primera estimación del campo de desplazamientos, el algoritmo ha de proceder a la compensación de los desplazamientos de las partículas, por medio de una deformación de la pareja de imágenes considerada.

Esto se hace a través del cálculo del vector desplazamiento correspondiente a cada pixel de las imágenes en examen, por medio de una interpolación bilineal del campo de desplazamientos en los nodos de la malla de cálculo y de la construcción de dos nuevas imágenes cuyo campo de intensidad luminosa se obtiene por la distorsión de las imágenes de partida, efectuada en base al campo de desplazamientos obtenidos, de forma que se reduzca la diferencia existente entre ellas.

A pesar de sus ventajas, la aplicación de la función de ponderación introduce un error en cada iteración que podría inducir medidas erróneas del campo de velocidad si no se interviene oportunamente (Nogueira et al. 1999).

Para evaluar los nodos afectados por errores en la medida tomada, debidos a la aplicación de la función peso utilizada, se procede a una nueva estimación de la matriz de los coeficientes de correlación de desplazamiento nulo en ventanas pequeñas y esa matriz, se compara con la obtenida anteriormente.

Todos los nodos caracterizados por un coeficiente de correlación inferior a aquel obtenido en la iteración anterior y con por lo menos 5 de los 8 nodos adyacentes caracterizados por la misma reducción de dicho coeficiente de correlación, se etiquetan como afectados por un error suficientemente significativo como para que se interrumpa el proceso iterativo. Obviamente ese procedimiento se efectúa para todos los nodos de la malla de cálculo.

La fase siguiente, en cada iteración, consiste en la aplicación de un algoritmo de validación de los vectores y sustitución de los espurios u *outliers*, después del cual las imágenes pasan por una nueva fase de deformación análoga a la que se ha anteriormente descrito.

Este procedimiento se repite usando la medida obtenida como nueva estimación preliminar del campo de desplazamientos hasta llegar a una situación en que todos los coeficientes de correlación de desplazamiento nulo, obtenidos con las ventanas de dimensiones reducidas mejoran solo para un número de nodos menor que el doble de los nodos en que se detecta un empeoramiento.

El campo de desplazamiento obtenido correspondientemente a cada iteración se tiene que sumar al obtenido en la precedente iteración para conseguir el desplazamiento total de las partículas.

Algunas modificaciones adicionales se han añadido para optimizar el funcionamiento de la técnica (Nogueira et al. 2002). En particular, para que los elevados gradientes de velocidad eventualmente presentes no introduzcan errores iniciales de alta frecuencia en las primeras etapas, los autores proponen la aplicación de un filtro pasa bajo sobre el campo de desplazamiento medido en las primeras dos iteraciones, antes de la fase de deformación de las imágenes. Aprovechando el uso de un filtro pasa bajo, la segunda de estas iteraciones se realiza con una ventana de  $W = 32$  píxeles sin perder robustez en exceso. En el resto de las iteraciones, la ventana de calculo de desplazamientos es siempre de  $W = 64$  píxeles.

Al final de esta primera fase, el objetivo principal es la mejora de la medida de velocidad en las escalas pequeñas. Para ello se aplica el esquema descrito antes en ausencia de filtros permitiendo una deformación de las imágenes basadas en los desplazamientos efectivos.

Durante las distintas iteraciones puede que algunos nodos converjan con mayor rapidez que otros. Por eso, Nogueira et al. (2001a) proponen la división de las iteraciones en dos partes a aplicar de forma sucesiva: la primera permite la evolución de todos los nodos de la malla de cálculo (es decir el cálculo del campo de desplazamiento correspondiente a cada nodo de la malla de cálculo); la segunda hace evolucionar sólo los nodos que tienen un valor del coeficiente de correlación inferior al valor medio de esa magnitud en el instante en que se pasa de la primera a la segunda parte de las iteraciones. La segunda parte entra en funcionamiento sólo cuando la primera se interrumpe por el hecho de que los picos de los coeficientes de correlación que mejoran sean menos del doble de los que empeoran con respecto a la iteración anterior.

La última parte de la técnica se repite de forma iterativa hasta que el número de coeficientes de correlación que empeoran entre una iteración y la siguiente sea mayor de los que mejoran, momento en que se da por concluido el proceso de medida de las imágenes de PIV. Para evitar una terminación excesivamente temprana en imágenes con gran dificultad de medida, adicionalmente a los procedimientos expuestos, se fuerza la realización de un mínimo de 5 iteraciones en la primera parte y de tantas iteraciones en la segunda parte como haya habido en la primera,

#### **4.4. Aplicación de métodos avanzados de 2D2C PIV en lecho fluido**

Durante el primer año de formación, se han efectuado medidas con la versión 6.2 del software de “La Vision” (La Vision, 2002), utilizado para la combinación objeto de esta Tesis. Estas medidas tenían como objetivo adicional la familiarización con las operaciones realizadas por el software comercial de La Vision y su manejo práctico en el caso 2D2C.

Dicho software se ha utilizado para medir el campo de velocidades en un lecho fluido, cuyo esquema experimental se presenta en la figura 4.4.1 y que se detalla a continuación.

Se disponía de un lecho fluido abierto bidimensional de las dimensiones 100x100x0,5 centímetros limitado por laminas planas de cristal. Los sólidos en el lecho se han fluidificado mediante aire comprimido. Como distribuidor de aire se ha utilizado una placa con 100 orificios de 1 mm de diámetro. Para asegurar una distribución uniforme de velocidad del aire en la entrada del distribuidor se ha montado un plenum con altura de 30 centímetros con un predistribuidor.

Como sólido a fluidificar se han utilizado partículas naturales de arena del cuarzo de diámetro medio de 300  $\mu\text{m}$ . La profundidad del lecho se ha fijado en 14 cm, resultando de esa forma una velocidad de fluidificación mínima de 57,3 cm/s. Todos los experimentos presentados aquí se han realizado a una velocidad de 160 cm/s en régimen burbujeante libre. De esta manera, se ha evitado el arrastre de las partículas fuera del lecho, siendo la velocidad terminal de las partículas mayor que la velocidad del gas en la superficie del lecho.

El lecho se ha iluminado uniformemente con una fuente de luz continua ortogonal a la pared de visualización. El acercamiento de la burbuja a la superficie y las imágenes de las erupciones de la burbuja se han tomado usando una cámara de vídeo CCD Kodak Motion Corder Analyzed SR con una frecuencia 250 Hz. El área visualizada corresponde a 15x16 cm (480x512 pixeles).

La cámara de vídeo y la fuente de luz han sido colocadas ambas en la parte delantera del lecho. Para evitar ruido óptico externo en las medidas de la trayectoria de la burbuja, se ha colocado una lámina de color negro sobre el lado trasero del lecho. Esta disposición produce imágenes de partículas blancas sobre un fondo negro.

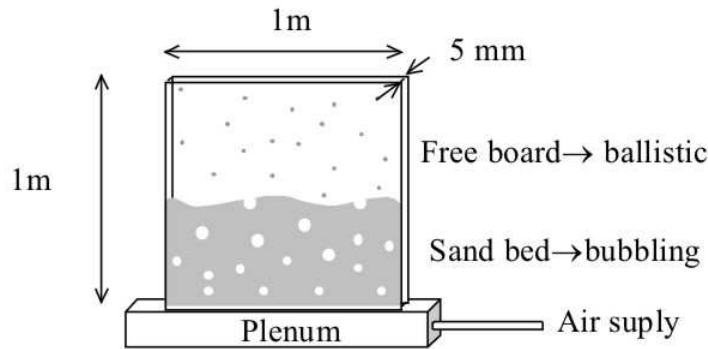


Figura 4.4.1: Esquema del lecho fluido

Por falta de resolución espacial, y por problemas relacionados con la calidad del sembrado (las propias partículas de arena) ha habido que recurrir las subrutinas del LFC-PIV.

En la figura 4.4.2 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos. En él se aprecian las distintas distribuciones de velocidad en burbujas de formas redondas y alargadas.

Otro ejemplo se presenta en la figura 4.4.3. En él se observan los campos de velocidades característicos cuando la ascensión de una burbuja inferior es ayudada por la estela de una burbuja anterior en el proceso de eyección de las partículas en el lecho fluido.

Más detalles sobre este estudio se pueden encontrar en el artículo publicado en la revista Powder Technology y en el que la doctoranda participa como segunda autora:

*“Initial particle velocity spatial distribution from 2-D erupting bubbles in fluidized beds”*. Santana D, Nauri S, Acosta A, García N, Macías-Machín A 2005, Vol. 150, pp. 1-8.

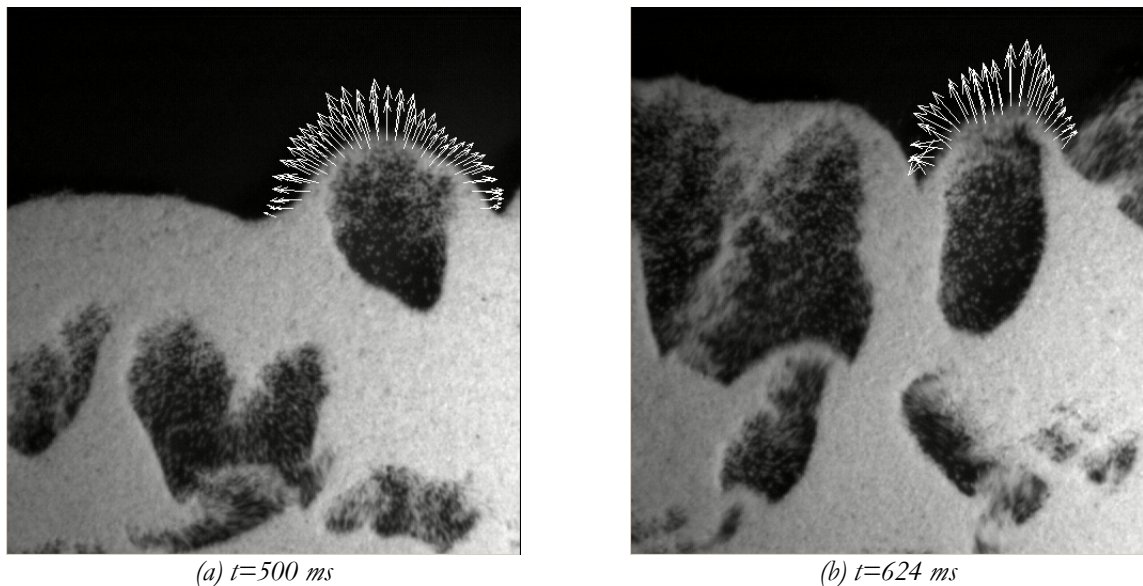
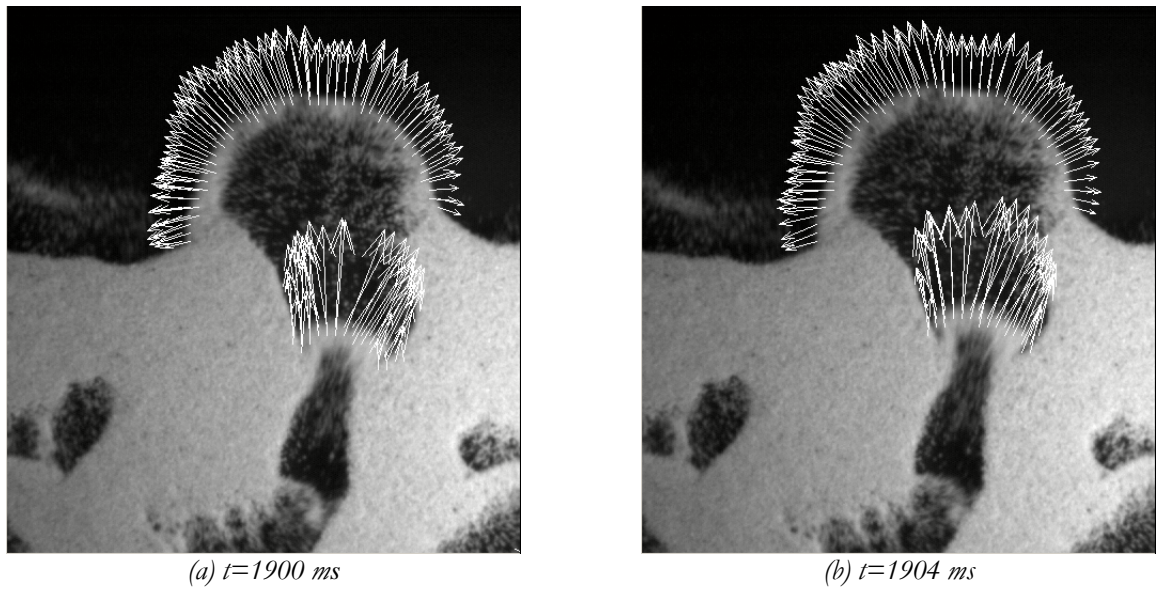


Figura 4.4.3: Ejemplo de campo de velocidad para burbujas de distinta forma: **a)** burbujas redondas **b)** burbujas alargadas





**Figure 4.4.3:** Campo de velocidades de la capa intermedia en tiempos consecutivos

Las medidas tomadas con el software de “La Vision” relativas a experimentos en el lecho fluido han indicado que el LFC-PIV proporciona resultados más precisos, sobre todo en aquellas áreas donde hay falta de resolución espacial y gradientes elevados de velocidad. Esto subraya la conveniencia de implementar la combinación de LFC-PIV con las técnicas estereoscópicas para disponer de sus capacidades en dicho entorno.

## 5. ESTEREO-PIV: ESTADO DEL ARTE

El método consistente en utilizar dos cámaras para obtener la percepción de profundidad, ha sido practicado durante muchas décadas en varias aplicaciones de ingeniería.

Este sistema de cámaras gemelas simula la visión binocular que permite a los seres humanos distinguir entre objetos cercanos y lejanos.

Básicamente, una visión única no puede determinar la profundidad de un objeto a lo largo de las líneas de visión. En cambio, la componente  $z$  de objetos a lo largo de líneas distintas a la de visión se percibe en la perspectiva de la imagen.

Cuando se mide el desplazamiento tridimensional de partículas, se puede caracterizar la situación con tres incógnitas  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ . La proyección desde un solo punto de vista, proporciona dos ecuaciones. La adición de un segundo punto de vista (visión estereoscópica), provee dos ecuaciones adicionales, que se pueden utilizar para obtener la información sobre la tercera componente. Nuestros ojos registran estas visiones simultáneamente y el cerebro es capaz de combinarlas en tiempo real y proveer una percepción tridimensional.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Hinsch (1995), un sistema de medida puede ser etiquetado como  $(k, l, m)$ , donde  $k = 1, 2, 3$  indica el número de componentes de velocidad medidas,  $l = 0, 1, 2, 3$  es el número de dimensiones del dominio de medida y  $m = 0, 1$  indica si el tiempo de grabación es instantáneo o continuo, respectivamente.

La Tesis se centra en el caso  $(3, 2, 0)$ , indicado como 2D3C PIV. En particular, se examinan en detalle las técnicas estereoscópicas que utilizan PIV con correlación espacial. También se mencionan algunos métodos alternativos que, pese a ser  $(3, 2, 0)$ , emplean otras estrategias (no estereoscópicas).

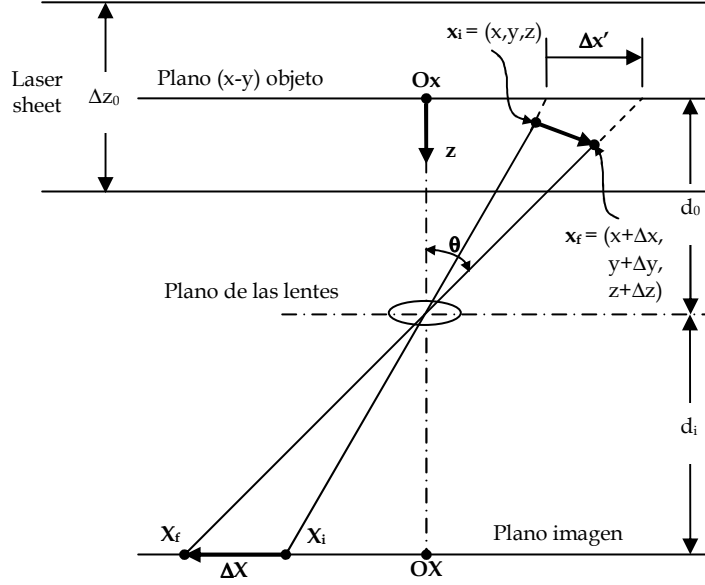
Todos los sistemas estereoscópicos, a pesar de las grandes variedades de configuraciones, deben satisfacer la condición básica de grabación de dos vistas distintas y simultáneas del mismo objeto. Estas dos vistas se combinan, a través de uno de los múltiples algoritmos disponibles, para reconstruir el campo tridimensional.

En este capítulo se examina en primer lugar la utilidad de sistemas estereoscópicos, analizando las limitaciones del PIV convencional con una sola cámara, y describiendo como sus limitaciones pueden ser superadas al añadir una segunda cámara. Posteriormente se examinan varias configuraciones estereoscópicas utilizadas por distintos autores poniendo de manifiesto las ventajas de cada una. Finalmente se describe el análisis de la magnitud de los errores en las distintas configuraciones.

### 5.1. El error en el cálculo de la velocidad con sistemas PIV convencionales

En la figura 5.1.1 se representa el esquema de un sistema PIV con una sola cámara. El eje de la cámara es perpendicular al plano de iluminación con el fin de obtener las componentes de velocidad en el plano. Se representa una partícula en una posición inicial genérica  $\mathbf{x}_i = (x, y, z)$ . Si dicha partícula estuviera en una posición inicial  $\mathbf{x}_i = (x, y, 0)$  formaría una imagen en  $\mathbf{X}_i = (-M_n x, -M_n y, 0)$ , donde  $M_n$  es la magnificación (i.e.  $M_n = d_i/d_o$ . Siendo  $d_o$  la distancia entre el plano de la lente y el plano del objeto y  $d_i$  la distancia correspondiente en el plano imagen). Conviene resaltar que, en este ejemplo, se describe el movimiento de una sola partícula cuya posición inicial se sitúa exactamente en el plano objeto ( $z = 0$ , es decir en el plano correspondiente al centro del espesor del plano láser).

En realidad, cada medida de PIV promedia el desplazamiento de todas las partículas contenidas en un volumen de interrogación, obtenido por la intersección del plano láser con la proyección del área de interrogación en el plano objeto. Al mismo tiempo, en un flujo real, estas partículas no pueden ser forzadas a empezar sus camino desde el plano objeto ( $z = 0$ ).



**Figura 5.1.1:** Error en la medida del desplazamiento en un plano, debido a un movimiento fuera del plano, utilizando una sola cámara (adaptado de Prasad y Adrian, 1993).

Sin embargo, Prasad y Adrian (1993) muestran que el proceso de integración de la contribución de múltiples partículas distribuidas uniformemente en el volumen de integración, reduce el problema físico a la situación representada en figura 5.5.1. Cuando la partícula a examen se desplaza desde la posición inicial, que se considera ahora con una  $z \neq 0$ ,  $x_i = (x, y, z)$  (formando una imagen  $X_i = (-M_i x, -M_i y, 0)$ , donde  $M_i = d_i / (d_0 - z)$ ) hasta la posición final  $x_f = (x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ , forma una imagen en  $X_f = (-M_f (x + \Delta x), -M_f (y + \Delta y), 0)$ , donde  $M_f = d_i / (d_0 - z - \Delta z)$  y el vector desplazamiento resultante grabado en plano imagen es:

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}_f - \mathbf{X}_i = (M_i x - M_f (x + \Delta x), M_i y - M_f (y + \Delta y), 0) \quad 5.1.1$$

En el caso de alta concentración de partículas y asumiendo una distribución uniforme, el desplazamiento medio en el volumen se puede expresar como:

$$\overline{\Delta \mathbf{X}} = \frac{1}{\Delta x_0 + \Delta y_0 + \Delta z_0} \int_{x-\Delta x_0/2}^{x+\Delta x_0/2} \int_{y-\Delta y_0/2}^{y+\Delta y_0/2} \int_{-z_0/2}^{z_0/2} \Delta \mathbf{X} \, dx \, dy \, dz \quad 5.1.2$$

Habiendo considerado un volumen de integración aproximadamente rectangular de dimensiones  $\Delta x_0, \Delta y_0$  y  $\Delta z_0$  y centrado en  $(x, y, 0)$ .

El resultado de la integral para la componente  $x$  es:

$$\overline{\Delta \mathbf{X}} = \frac{d_i}{\Delta z_0} \left[ x \ln \left( \frac{d_0 + \Delta z_0/2}{d_0 - \Delta z_0/2} \right) - (x + \Delta x) \ln \left( \frac{d_0 + \Delta z_0/2 - \Delta z}{d_0 - \Delta z_0/2 - \Delta z} \right) \right] \quad 5.1.3$$

La expresión para  $\overline{\Delta \mathbf{Y}}$  se obtiene de forma similar y obviamente  $\overline{\Delta \mathbf{Z}} = 0$ . Cuando  $\Delta z_0/d_0 \ll 1$ , la ecuación del desplazamiento en el plano imagen se puede simplificar. Dividiendo la ecuación 5.1.3 por los términos no despreciables ( $d_0$  para el primer cociente y  $(d_0 - \Delta z)$  para el segundo) y desarrollando en serie de Taylor, para el vector desplazamiento en el plano imagen se obtiene:

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}_f - \mathbf{X}_i = \left( -M_n \frac{\Delta x + x \Delta z / d_0}{1 - \Delta z / d_0}, -M_n \frac{\Delta y + y \Delta z / d_0}{1 - \Delta z / d_0}, 0 \right) \quad 5.1.4$$

El error que se comete es del orden de  $(\Delta z_0 / d_0)^2$ , donde  $\Delta z_0$  es el espesor del plano láser. Para una medida típica de PIV,  $\Delta z_0 \approx 1 \text{ mm}$  y  $d_0$  es del orden de centenares de milímetros, de modo que este error es despreciable. La ecuación 5.1.4 se puede obtener directamente desde la 5.1.1 imponiendo  $z = 0$ ,  $M_i = d_i / d_0$  y  $M_f = d_i / (d_0 - \Delta z)$ . Es decir que el desplazamiento promediado en el volumen de control coincide con aquel de una sola partícula situada en  $z = 0$  en la primera exposición. La implicación es que el proceso de integración en un volumen de interrogación elimina la posición actual  $z$  de la partícula como parámetro del problema. Por eso, en el resto del texto y figuras de este documento se considera el desplazamiento de una sola partícula cuya posición inicial será  $z = 0$ .

Refiriéndose otra vez a la figura 5.1.1, se puede observar que las partículas que no están situadas directamente en el eje de la cámara y que experimentan un movimiento  $\Delta z$  fuera del plano, registran un desplazamiento  $\Delta \mathbf{X}$ , que no se corresponde con el desplazamiento real en el plano,  $(\Delta x, \Delta y)$ . En realidad,  $\Delta \mathbf{X}$  es la proyección de un movimiento aparente en el plano igual a  $\Delta \mathbf{x}' = -\Delta \mathbf{X} / M_n$  en el plano objeto, es decir,

$$\Delta \mathbf{x}' = \left( \frac{\Delta \mathbf{X}}{-M_n} \right) = \left( \frac{\Delta x + x \Delta z / d_0}{1 - \Delta z / d_0}, \frac{\Delta y + y \Delta z / d_0}{1 - \Delta z / d_0}, 0 \right)$$

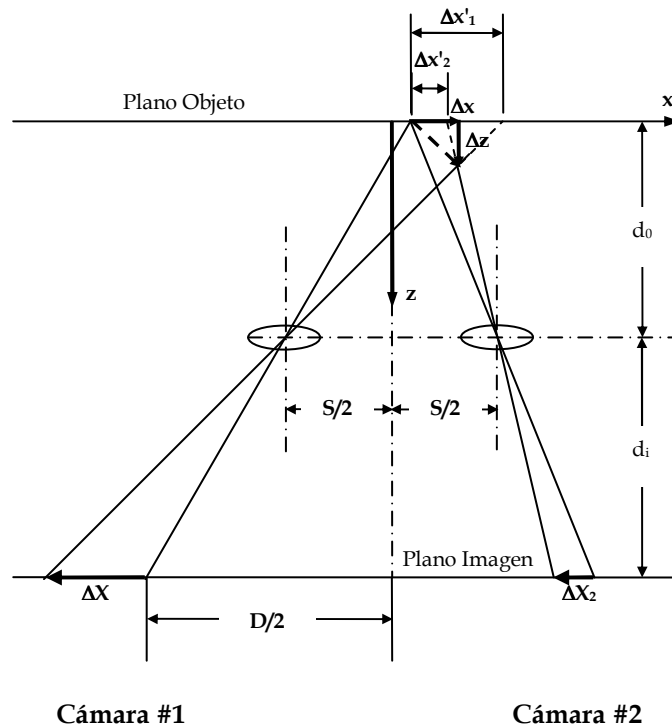
El error relativo entre el desplazamiento verdadero y el aparente,  $\varepsilon$ , se denomina error de perspectiva, y es igual a:

$$\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y) = \left( \frac{\Delta x'}{\Delta x} - 1, \frac{\Delta y'}{\Delta y} - 1 \right) = \left( \frac{\Delta z}{\Delta x} \tan \theta_x, \frac{\Delta z}{\Delta y} \tan \theta_y \right) \quad 5.1.5$$

Donde  $\theta_x$  y  $\theta_y$  son las proyecciones de  $\theta$  en los planos  $x$ - $z$  e  $y$ - $z$  respectivamente.

El error de perspectiva puede contaminar significativamente la medida en el plano cuando la componente fuera de él sea grande así como cuando el ángulo  $\theta$  donde se localiza la partícula vista desde la cámara es grande. Por ejemplo, un ángulo de  $5^\circ$  en el borde de la región de interés visto desde las lentes (entre el eje de las lentes y el límite del área de interés,  $\theta$  en figura 5.1.1) puede causar un error del orden del 10%, en una medida de PIV con una sola cámara. Este resultado coincide con los datos de Jacquot y Rastogi (1981) en el caso de desplazamientos de superficies sólidas.

El PIV estereoscópico elimina este problema adquiriendo dos vistas simultáneas desde dos direcciones distintas como se muestra en la figura 5.1.2.



**Figura 5.1.2:** Esquema de estereocámaras en configuración de traslación (adaptado de Prasad, 2000)

## 5.2. Configuraciones estereoscópicas

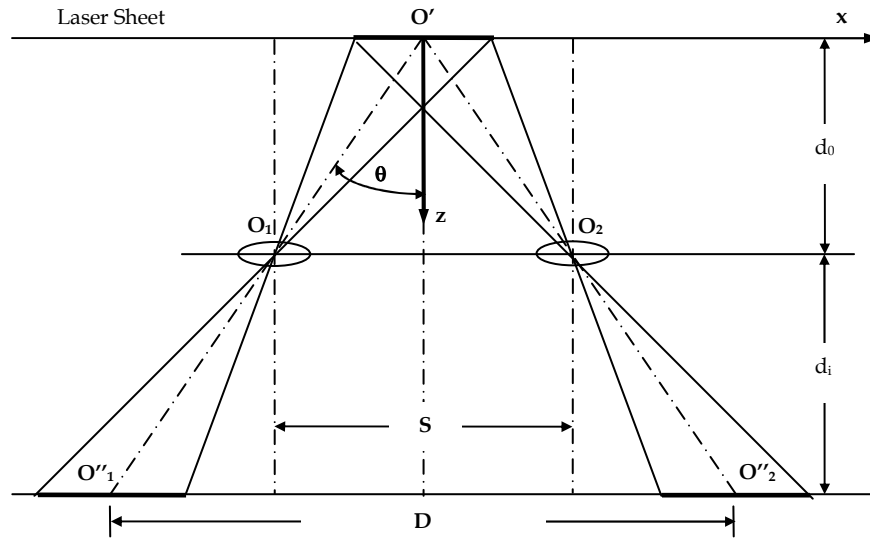
Los sistemas estereoscópicos comúnmente utilizados pueden ser clasificados del siguiente modo:

1. Sistemas de traslación, también conocidos como “de desplazamiento lateral”
2. Sistemas de rotación, denominados también como “de desplazamiento angular”

A continuación se comentan estos sistemas, analizando sus variaciones. Otras configuraciones, que no pueden ser estrictamente clasificadas como sistemas de traslación o rotación, serán discutidas a continuación de dichas variantes básicas.

### 5.2.1. Sistemas de traslación

En los sistemas de traslación, los ejes de ambas cámaras son paralelos y ortogonales al plano láser. Este sistema está representado en las figuras 5.1.2 y 5.2.1. Aunque en figura 5.1.2 las dos cámaras se representan como simétricas con respecto al eje del sistema, esta simetría no es necesaria. Por ejemplo la separación de cada lente del eje del sistema así como la magnificación de cada cámara puede ser distinta. Sin embargo, se suelen implementar sistemas simétricos. La configuración de traslación ha sido descrita, entre otros, por Jacquot y Rastogi (1981), Gauthier y Riethmuller (1988), Sinha (1988), Lawson y Wu (1997a), y ha sido utilizada para medición por Arroyo y Greated (1991), Sinha y Kuhlman (1992), Prasad y Adrian (1993a, b), Synnergren (1997), Solof et al. (1997), Liu et al (1997), Lecerf et al. (1999).



**Figura 5.2.1:** Esquema básico de estereocámaras en configuración de traslación (adaptado de Prasad y Adrian, 1993a)

Una de las ventajas de esta configuración es su simplicidad. El hecho de que el plano objeto, el plano de las lentes y el plano imagen sean paralelos, hace que el campo de la imagen presente una magnificación uniforme. Adicionalmente, en ausencia de saltos del índice de refracción a lo largo del camino óptico desde el plano de las lentes hasta el plano imagen (como aquellos causados, por ejemplo, por una grabación a través de una espesa capa líquida), la calidad de la imagen de la partícula no está comprometida. Se puede conseguir una imagen bien enfocada sin la necesidad de reducir la apertura más de lo que se hace en PIV con una sola cámara (i.e., la condición de profundidad de campo es la misma). Las dos vistas se pueden superponer fácilmente sin las manipulaciones adicionales que necesitaría el caso de magnificación no uniforme. Además, la resolución espacial de los campos combinados es idéntica a aquella relativa a dos vistas individuales.

Gauthier y Riethmuller (1988) objetan a este método la pequeña “área común” vista desde cada cámara. Sin embargo, Prasad y Adrian (1993a), muestran como el área común puede ser maximizada desalineando cada sensor con respecto al eje de la lente como en la figura 5.2.1, de forma que:

$$D = (1 + M_n) \cdot S$$

Donde  $D$  es la distancia entre los centros de los sensores y  $S$  es la distancia entre los ejes de las lentes. Los autores hacen notar que ese off-set puede ser difícil de obtener con cámaras CCD.

El inconveniente más relevante de los sistemas de traslación es la existencia de un límite superior para el ángulo  $\theta$  entre el eje  $z$  y la recta que une el centro de la zona de interés con el centro de la lente (ver Fig.5.2.1). Esta restricción es debida al diseño usual de las lentes: si estas están separadas por un valor,  $S$ , demasiado grande con respecto a una distancia fijada  $d_0$ , las características de las lentes se degradan al ser llevadas a operar fuera de los límites de sus especificaciones. En la sección 5.3, relativa al análisis de los errores, se muestra como el error relativo de la componente fuera del plano disminuye cuando el ángulo  $\theta$  aumenta; eso implica que el sistema de traslación está de alguna forma limitado en la precisión de la medida de la componente fuera del plano. Los resultados obtenidos por Prasad y Adrian (1993a), Arroyo y Greated (1991), Soloff et al. (1997) indican que dicho error excede aquel relativo a la componente

en el plano en un factor de 3 a 4 en el caso de sistemas de traslación, con ángulo  $\theta \approx 15^\circ$ . En el caso de Prasad y Adrian (1993a), los valores cuadráticos medios o *rms* de los errores relativos a las componentes en el plano y ortogonal vale  $1\mu\text{m}$  y  $4\mu\text{m}$  respectivamente, para una distancia plano objeto- plano lentes,  $d_0$ , de 247 mm, siendo estos datos una referencia útil para comparar con los otros sistemas que se comentan más adelante.

La relación geométrica entre el desplazamiento real ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$ ) y el desplazamiento aparente medido por la cámara 1 ( $\Delta X_1$ ,  $\Delta Y_1$ ) y por la cámara 2 ( $\Delta X_2$ ,  $\Delta Y_2$ ), puede ser derivada examinando las relaciones geométricas de la figura 5.1.2, como muestran Prasad y Adrian (1993):

$$\Delta z = \frac{-d_0(\Delta X_1 - \Delta X_2)}{M_n S - (\Delta X_1 - \Delta X_2)} \quad 5.2.1$$

$$\Delta x = \frac{\Delta X_1(x - S/2) - \Delta X_2(x + S/2)}{M_n S - (\Delta X_1 - \Delta X_2)} \quad 5.2.2$$

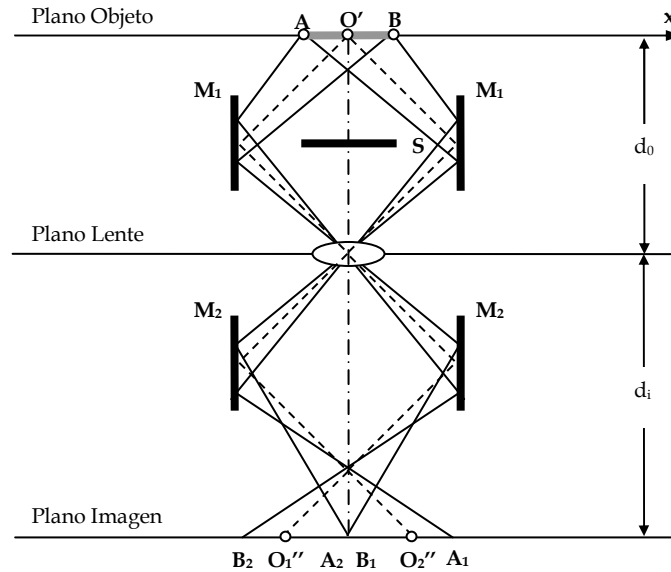
$$\Delta y = \frac{-y\Delta z}{d_0} + \frac{\Delta Y_1 + \Delta Y_2}{2M_n} \left[ \frac{\Delta z}{d_0} - 1 \right] \quad 5.2.3$$

Las dos vistas proporcionan cuatro ecuaciones y tres incógnitas. La ecuación adicional puede ser utilizada para incrementar la precisión de la componente  $\Delta y$ . Esta operación se efectúa en la ecuación 5.2.3, donde se promedia el valor  $\Delta y$  obtenido por cada cámara.

Arroyo y Greated (1991) proponen una variación del sistema de traslación que utiliza una sola cámara (figura 5.2.2). En esta configuración se pone una pareja de espejos  $M_1$  entre el plano objeto y el plano de la lente y una segunda pareja  $M_2$  entre el plano de la lente y el plano imagen. Los primeros espejos  $M_1$  tienen que ser perfectamente perpendiculares al plano láser para que el eje óptico de las lentes sea perpendicular al mismo. Los espejos tienen también que estar posicionados en el medio entre el objeto y el plano de la lente para que la luz recogida por ellos desde el objeto pase justo por el centro de la lente. Esta alineación puede ser verificada experimentalmente, reduciendo la abertura de la lente y controlando que las dos imágenes estén cortadas de la misma forma. El ajuste entre los primeros dos espejos será perfecto cuando las dos imágenes reflejadas (formadas por los espejos) estén posicionadas simétricamente respecto a la imagen central (formada directamente por la lente) y las tres imágenes estén en la misma posición y.

La finalidad de la segunda pareja de espejos, que tiene que estar posicionada de forma perfectamente perpendicular al sensor, es la de dirigir la luz de modo que las dos imágenes se formen en la parte posterior de la cámara, cada una en una mitad distinta del sensor.

En teoría, las tres imágenes están enfocadas en el mismo plano, pero en la práctica, y debido a las aberraciones, se enfocan un poco más cerca de la lente con respecto a la imagen central. Al ser la imagen central más luminosa que las reflejadas (aproximadamente 1,5 veces) y estando superpuesta a ellas, ésta tiene que estar físicamente bloqueada. Por eso se pone un objeto opaco S entre los dos espejos  $M_1$ , cuya dimensión y posición no es crítica. En este caso, los *rms* de los errores relativos a la componente en el plano y aquella ortogonal valen  $3\mu\text{m}$  y  $10\mu\text{m}$  respectivamente, para una distancia plano objeto- plano lentes,  $d_0$ , de 266 mm.



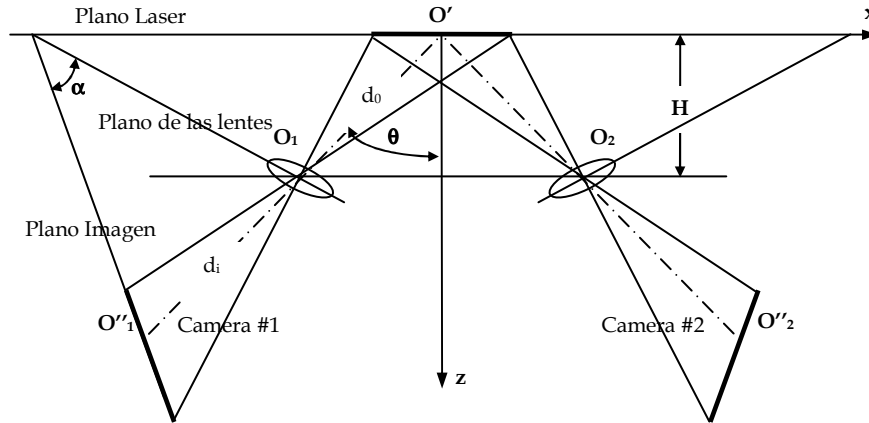
**Figura 5.2.2:** Configuración de traslación con una sola cámara (adaptado de Arroyo and Greated, 1991)

Prasad y Adrian (1993a, b) han aplicado la configuración de traslación a flujos donde el plano objeto está situado dentro de una espesa capa líquida. El salto del índice de refracción en la interfase entre gas y líquido causa algunas dificultades. En primer lugar las aberraciones debidas a la interfase hacen que las imágenes de las partículas estén distorsionadas radialmente, y, en segunda instancia, el plano en el cual las partículas podrían ser obtenidas con un buen enfoque no es paralelo al plano objeto y tiene que estar inclinado un cierto ángulo con respecto a éste. El primer problema fuerza a utilizar un bajo número- $f$ , y el segundo causa una magnificación no uniforme. Debido a ello, las ventajas de la utilización del sistema de traslación en este tipo de aplicaciones se ven disminuidas.

### 5.2.2. Sistemas de rotación

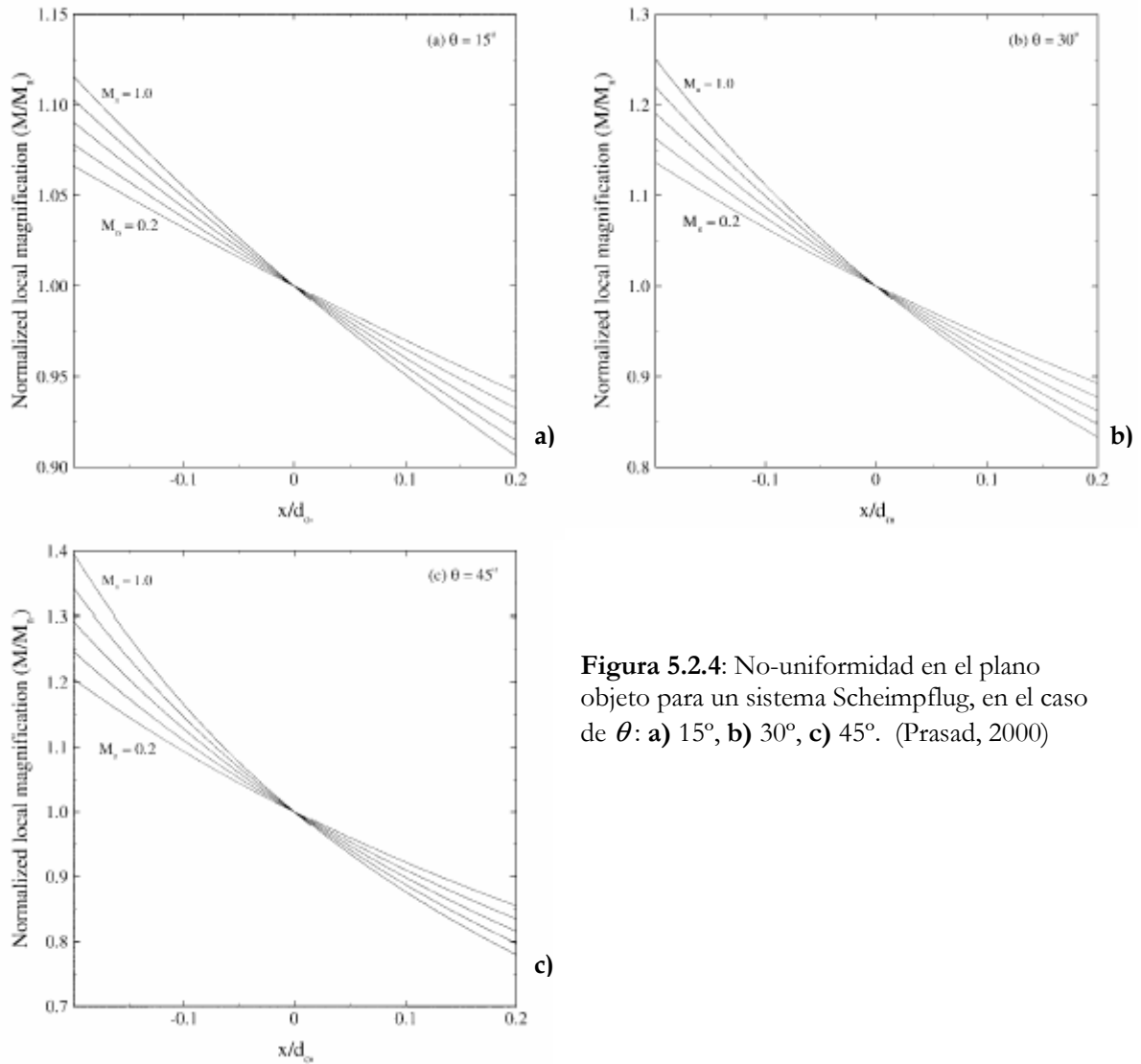
En los sistemas de desplazamiento angular, no hay restricciones sobre el ángulo  $\theta$  impuestas por la configuración de traslación. Como se muestra en la figura 5.2.3, los dos ejes de la cámara no son paralelos entre sí sino que se hacen rotar de forma que los dos ejes se intersequen el plano objeto. En este caso el ángulo  $\theta$  puede tomar valores grandes sin incurrir en problemas relacionados con las características de las lentes, permitiendo así más precisión para la componente fuera del plano. Sin embargo, la magnificación ya no es uniforme en el campo de visualización. Adicionalmente, como se puede apreciar en la figura 5.2.3, el plano imagen tiene que ser rotado también un ángulo  $\alpha$  con respecto al plano de la lente, de forma que el plano objeto, el plano de la lente y el plano imagen sean colineales. Esta condición, denominada condición de Scheimpflug (Altenhofen 1952), asegura que todas las partículas del plano objeto estén bien enfocadas en el plano imagen.





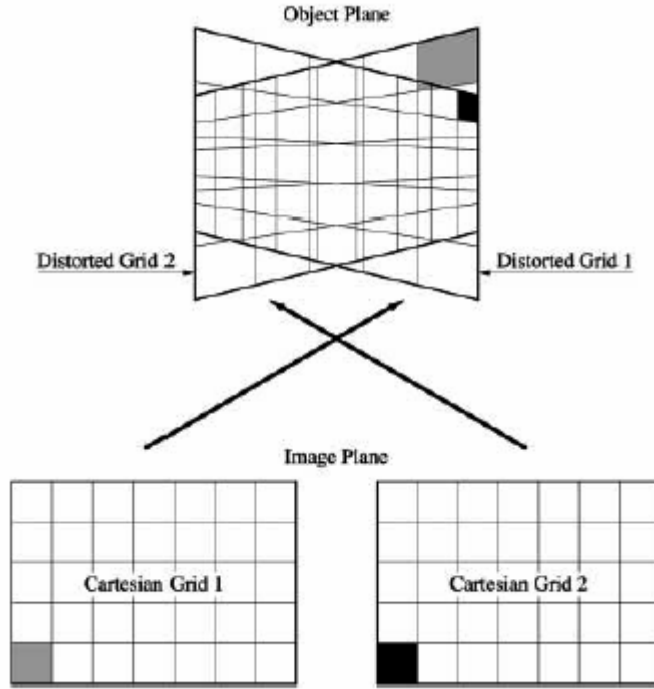
**Figura 5.2.3:** Esquema básico de estéreo-cámaras en configuración de rotación

Sin embargo, la condición de Scheimpflug aumenta la no-uniformidad de la magnificación. La figura 5.2.4 ilustra la variación de la magnificación en el plano objeto para un sistema Scheimpflug, en el caso de  $\theta$  respectivamente de (a)  $15^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $45^\circ$ .



**Figura 5.2.4:** No-uniformidad en el plano objeto para un sistema Scheimpflug, en el caso de  $\theta$ : a)  $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$ . (Prasad, 2000)

En dicha figura, la magnificación nominal, que para un sistema Scheimpflug es  $M_n = \tan \alpha / \tan \theta$ , varía entre 0,2 y 1,0 con paso 0,2. La distancia a lo largo del eje horizontal en el plano objeto,  $x$ , está normalizada con la distancia  $d_0$  (Fig. 5.2.3) y la magnificación local resultante se normaliza con la magnificación nominal (particularizada para  $x/d_0 = 0$ ). Se puede observar que la no-uniformidad aumenta con  $|x|$ ,  $\theta$  y  $M_n$ . Los datos en figura 5.2.4 son válidos sólo en el eje  $x$ . Se observa que, para una  $x$  determinada, la no-uniformidad aumenta con la distancia del eje  $x$ .



**Figura 5.2.5:** Estiramiento opuesto de las mallas cartesianas en el plano imagen mapeadas sobre el plano objeto (Westerweel et al., 1999)

Además de la no-uniformidad, el sistema a desplazamiento angular representado en la figura 5.2.3 produce campos de imágenes distorsionadas de forma opuesta. Este efecto está representado en la figura 5.2.5, donde ventanas de interrogación cuadradas en el plano imagen producen en el plano objeto trapezoides no coincidentes, deformados de modo simétrico.

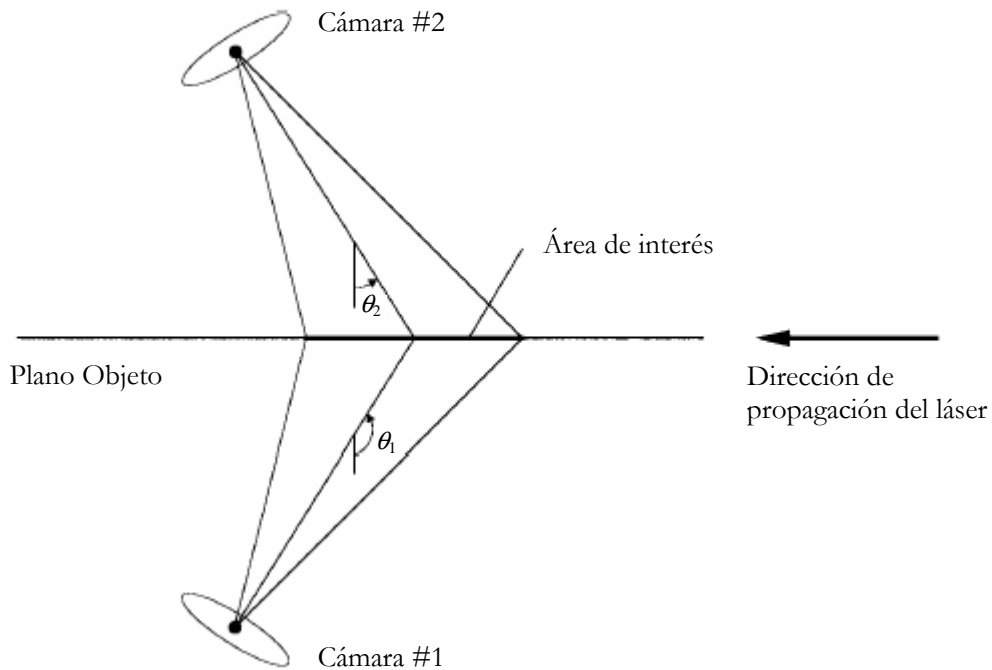
Como se indica en las regiones sombreadas, para medidas como las de PIV, no es posible combinar directamente la información desde cada vista del plano objeto sin interpolar anteriormente los datos en una malla común. Se quiere resaltar que las dos mallas distorsionadas representadas en la figura 5.2.5 permiten máxima superposición una vez corregidas. Para ello las dos cámaras tienen que estar más cerca entre sí de lo que parece en la figura 5.2.3, de forma que los dos ejes ópticos no se intersequen en el plano objeto, sino que en frente de él (Westerweel y van Oord, 1999).

Es posible emplear la configuración de desplazamiento angular sin utilizar la condición de Scheimpflug (fijando  $\alpha = 0$ ), reduciendo la no-uniformidad de la magnificación. En este caso, las partículas pueden estar bien enfocadas sólo si se asegura una profundidad de campo  $\delta_z$  del sistema lo bastante grande como para abarcar la variación de la distancia del objeto. Adrian (1991) proporciona la siguiente dependencia de la profundidad de campo:

$$\delta_z = 4(1 + M_n^{-1})^2 f^{\#2} \lambda$$

Donde  $M_n$  es la magnificación de la cámara, y  $\lambda$  es la longitud de onda del láser. Para una magnificación dada, se puede obtener una gran profundidad de campo sólo con la condición de aumentar el número-f,  $f^\#$ . Sin embargo, esto implica que sólo una pequeña fracción de la luz difundida por la partícula llegue al sensor.

Respecto al esquema de la figura 5.2.3, Willert (1997) utiliza una variación del sistema de variación angular de Scheimpflug, en el cual se posiciona una cámara a cada lado del plano láser (Fig. 5.2.6). Esta configuración permite a las dos cámaras utilizar mejor las propiedades de dispersión frontal de la luz o *forward-scattering* de las partículas utilizadas como trazadoras (partículas de aceite de  $1\mu\text{m}$  de diámetro en dicho artículo). Siendo la eficiencia de la dispersión bastante más alta en la dirección de *forward scattering*, las dos vistas pueden dar resultados con una relación señal/ruido mayor (e igual para las dos). En esta configuración angular, la proyección hacia atrás o *back-projection* (es decir la proyección del plano imagen sobre el plano objeto) también causa una imagen de forma trapezoidal. Sin embargo, siendo las dos cámaras simétricas entre sí, el campo de vista trapezoidal se solapa en su totalidad, permitiendo una medida de PIV 3C sobre toda el área del sensor. Esta es una ventaja con respecto a la configuración angular “clásica” donde las dos cámaras están posicionadas en el mismo lado respecto al plano láser y, como se ha comentado, se generan dos campos de vista trapezoidales que no concuerdan en toda su superficie (figura 5.2.5). Esto se traduce en que el campo de vista común disminuye. Por otro lado queda el problema de interpolar las dos vistas sobre una malla cartesiana.



**Figura 5.2.6:** Esquema de estereocámaras en configuración de variación angular de Scheimpflug, con una cámara en cada lado del plano láser (adaptado de Willert, 1997)

### 5.2.3. Estéreo-PIV con múltiples planos

Las configuraciones estereoscópicas descritas previamente proporcionan resultados dentro de un solo plano. Generalmente no producen información suficiente como para determinar todos los términos relacionados con la velocidad en las ecuaciones que gobiernan el flujo (como las ecuaciones de Navier-Stokes) que resumen gran parte de los conocimientos de la mecánica de fluidos (Kaelher y Kompenhans 1999). En flujos como los de chorros cruzados, el conocimiento del

campo vectorial de la vorticidad (en las tres componentes) es muy importante para evaluar la evolución y la interacción de distintos torbellinos, estructuras coherentes y demás características de dicho flujo. En la teoría estadística de la turbulencia, los términos de correlaciones espaciales y temporales de variables como la velocidad, junto con el espectro de las fluctuaciones, son muy importantes para el desarrollo de los modelos de turbulencia. Todas estas informaciones sobre el flujo no siempre pueden ser obtenidas utilizando los resultados del PIV estereoscópico “convencional”, es decir obtenido sobre un solo plano del fluido.

Kaelher y Kompenhans (1999) y Hu et al. (2001) proponen un sistema estereoscópico con múltiples planos que permite la obtención simultánea e instantánea de los campos de velocidad en dos planos separados espacialmente. Esto permite obtener las tres componentes de la vorticidad del flujo. Ajustando oportunamente el espacio entre los dos planos láser y/o el intervalo de tiempo entre los pulsos láser, se pueden obtener también las distribuciones de varios coeficientes de correlación espacial y/o temporal de las variables del flujo (Hu et al. 2001).

Obviamente el punto clave de las medidas simultáneas de PIV estereoscópico en dos (o más) planos separados espacialmente es grabar las imágenes de las partículas trazadoras separadamente en cada plano iluminado. Si, los dos planos son iluminados simultáneamente; sin ninguna disposición especial, la luz difundida incide sobre la cámara, confundiendo las imágenes de las partículas y haciendo la medida imposible.

Para discriminar el plano de procedencia de la luz difundida, se pueden utilizar dos métodos:

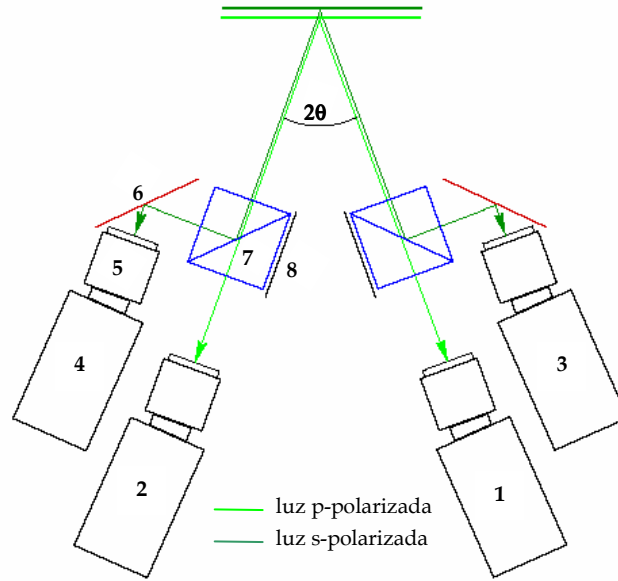
- El método de separación por colores, donde los dos planos de medida están iluminados por dos planos láser de distintos colores, es decir con diferente longitud de onda. La luz difundida por las partículas en los dos planos láser puede ser separada utilizando filtros ópticos cromáticos.
- El método de separación por dirección de polarización, en el que se ilumina el campo de interés del flujo utilizando planos de luz con direcciones de polarización lineal ortogonales. La luz difundida por las partículas en los dos planos láser puede ser separada utilizando filtros ópticos polarizados

En el primer método se necesitan láseres distintos para generar planos de diferente longitud de onda o bien se pueden hacer modificaciones ópticas dentro del láser para generar luz de diferentes armónicos desde el mismo láser (como por ejemplo láser pulsado de Nd:Yag), perdiendo algo de energía. Comparado con el método de separación de colores, el método de separación por dirección de polarización tiene una mayor simplicidad en la disposición óptica, que puede ser lograda instalando determinadas ópticas fuera de la cabeza del láser.

Kaelher y Kompenhans (1999) y Hu et al. (2001) utilizan este segundo método para efectuar medidas simultáneas de PIV estereoscópico en dos planos separados espacialmente.

El sistema de estéreo PIV en la configuración utilizada por dichos autores, representada en la figura 5.2.7, consiste en un sistema láser de cuatro pulsos que emiten luz ortogonalmente polarizada, dos parejas de cámaras en configuración angular con corrección de Scheimpflug, dos espejos de alta eficiencia, y dos prismas polarizantes separadores de rayos.

A partir de la iluminación de las partículas con luz láser ortogonalmente polarizada, el prisma polarizante separa el frente de la onda incidente difundida por las partículas en dos rayos. La luz difundida por las partículas del plano láser horizontalmente polarizado (P-polarized) pasa directamente a través del prisma y los rayos son detectados por las cámaras 1 y 2 (Fig. 5.2.7). La luz difundida por las partículas del plano láser verticalmente polarizado (S-polarized) sale del prisma con un ángulo recto respecto al rayo incidente. Antes de pasar por las lentes de las cámaras 3 y 4, la luz S-polarizada que sale de los prismas es reflejada por dos espejos para conseguir una idéntica orientación del plano imagen para todas las cámaras. Esa operación simplifica el acoplamiento de las cuatro áreas de observación y ahorra tiempo de la CPU durante la evaluación de las imágenes.



**Figura 5.2.7:** Esquema de estereo-cámaras en configuración a variación angular de Scheimpflug con múltiples planos: 1-4 cámaras, 5 lente, 6 espejo, 7 prisma polarizante separador de rayos, 8 material absorbente,  $2 \cdot \theta$  ángulo de apertura

Para evitar la reducción del contraste en el plano imagen causada por la luz de fondo, la superficie de cada prisma, en la que no entra ni sale la luz difundida por las partículas, necesaria para la medida PIV, se recubre con un material absorbente (8 en figura 5.2.7).

### 5.3. Análisis de los errores

Arroyo y Grated (1991), Prasad y Adrian (1993a) y Lawson y Wu (1997a) presentan análisis de errores relativos a sistemas estereoscópicos de traslación. Lawson y Wu (1997a) y Zang y Prasad (1997) presentan análisis de errores para la configuración angular, los últimos incluyendo la condición de Scheimpflug. De éstos, Lawson y Wu (1997a) analizan también la variación de los errores para posiciones fuera del eje.

Basándose en los métodos estándar de evaluación de errores, las indeterminaciones en los desplazamientos calculados (ecuaciones 5.2.1-5.2.3) se pueden relacionar con aquellas relativas a los parámetros geométricos de la configuración estereoscópica de las cámaras. Por simplicidad, esta configuración se denominará de aquí en adelante “estéreo cámara”. Asumiendo una grabación perfecta, que las variables no estén correlacionadas y que estén distribuidas con una desviación estándar,  $\sigma$ , se obtiene:

$$\left[ \frac{\sigma_{\Delta z}}{\Delta z} \right]^2 = \left( \sigma_{\Delta x_1}^2 + \sigma_{\Delta x_2}^2 \right) \left[ \frac{d_0}{M_n S \Delta z} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_S}{S} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{M_n}}{M_n} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{d_0}}{d_0} \right]^2 \quad 5.3.1$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x} \right]^2 &= \left[ \frac{\sigma_{\Delta X_1}^2 \left( x - \frac{S}{2} \right)}{M_n S \Delta x} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{\Delta X_2}^2 \left( x + \frac{S}{2} \right)}{M_n S \Delta x} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{M_n}}{M_n} \right]^2 + \\ &+ \left[ \frac{\sigma_S}{S} \frac{\Delta z}{\Delta x} \frac{x}{d_0} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_x}{d_0} \frac{\Delta z}{\Delta x} \right]^2 \end{aligned} \quad 5.3.2$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\sigma_{\Delta y}}{\Delta y} \right]^2 &= \left( \sigma_{\Delta X_1}^2 + \sigma_{\Delta X_2}^2 \right) \left[ \frac{y}{M_n S \Delta y} \right]^2 + \left( \sigma_{\Delta Y_1}^2 + \sigma_{\Delta Y_2}^2 \right) \left[ \frac{1}{2 M_n \Delta y} \right]^2 + \\ &+ \left[ \frac{\sigma_{M_n}}{M_n} \left( 1 + \frac{\Delta z y}{\Delta y d_0} \right) \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_S}{S} \frac{\Delta z}{\Delta y} \frac{y}{d_0} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[ \frac{\sigma_y}{d_0} \frac{\Delta z}{\Delta y} \right]^2 \end{aligned} \quad 5.3.3$$

De las indeterminaciones descriptas arriba,  $\sigma_{\Delta X_j}$  y  $\sigma_{\Delta Y_j}$  ( $j = 1, 2$ ) surgen exclusivamente de la interrogación de la fotografía PIV e incluyen errores aleatorios y sistemáticos (Prasad 1992).

Las restantes indeterminaciones  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_S$ ,  $\sigma_{M_n}$  y  $\sigma_{d_0}$  son debidas a errores en las medidas de las distancias en la estéreo cámara. Puede ser útil estudiar la dependencia de los errores en el desplazamiento calculado debidos puramente a los errores de interrogación PIV. Asumiendo  $\sigma_{\Delta X_j} = \sigma_{\Delta X_2} = \sigma_{\Delta Y_j} = \sigma_{\Delta Y_2} = \sigma_{\Delta X}$ , se obtiene:

$$\sigma_{\Delta z} \approx \sqrt{2} \left[ \frac{d_0}{MS} \right] \sigma_{\Delta X}$$

$$\sigma_{\Delta x} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{M} \right] \sigma_{\Delta X} \quad (\text{por } x = 0)$$

$$\sigma_{\Delta y} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{M} \right] \sigma_{\Delta X} \quad (\text{por } y = 0)$$

De este modo, el error relativo en la componente fuera del plano (por  $x = y = 0$ ) se reduce a:

$$\frac{\sigma_{\Delta z}}{\sigma_{\Delta x}} = \frac{\sigma_{\Delta z}}{\sigma_{\Delta y}} = 2 \frac{d_0}{S} = \frac{1}{\tan \theta} \quad 5.3.4$$

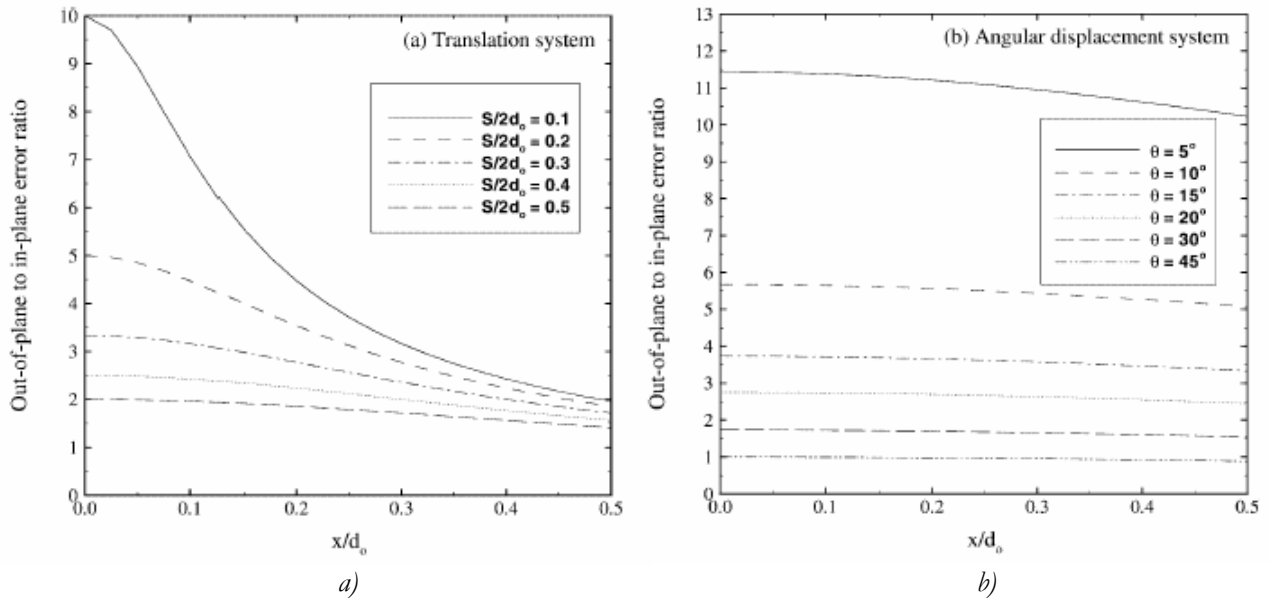
El error relativo en la componente fuera del plano se obtiene así como el recíproco de la tangente del ángulo  $\theta$  (Fig. 5.2.1, 5.2.3). Aunque este análisis se refiera a sistemas de traslación, Zang y Prasad (1997) muestran que también en el sistema Scheimpflug de rotación el error de la componente fuera del plano varía de la misma forma con el ángulo  $\theta$ . El valor absoluto del error de la componente en el plano es  $1/\sqrt{2}$  veces el valor correspondiente a la configuración con una sola cámara. Eso es debido a que dos cámaras contribuyen igualmente al resultado final de la medida.

Adicionalmente, la configuración estéreo elimina los errores de perspectiva comentados en el apartado 5.1, que pueden ser relevantes en una medida PIV con una sola cámara.

Lawson y Wu (1997a) presentan la variación del error relativo fuera del plano como función de  $x/d_0$ . Como se muestra en la figura 5.3.1a en el caso de configuración de traslación, el error relativo disminuye rápidamente con  $x/d_0$  cuando  $S/2d_0 = \tan \theta < 0,2$ , i.e.  $\theta < 10^\circ$ , volviéndose, sin embargo, más o menos invariante para valores de ángulo mayores. En el caso de sistema de variación angular, el error es una “función débil” de  $x/d_0$  para los intervalos analizados ( $5^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ).

Para nivelar los errores de la componente perpendicular al plano y de las componentes contenidas en el plano, es deseable un valor del ángulo  $\theta$  de  $45^\circ$ ; sin embargo, ángulos grandes causan una sensible no-uniformidad de la magnificación.

Cabe resaltar que este análisis de errores no incluye los errores de correspondencia de la localización que aparecen cuando las dos vistas están impropriadamente corregidas después de la proyección en el plano objeto. Ese desajuste hace que se combinen informaciones sobre la velocidad desde regiones distintas del campo iluminado, induciendo ulteriores errores.



**Figura 5.3.1:** Variación de la relación del error de la componente fuera del plano con el de aquellas contenidas en el plano en función de la posición  $x$  fuera del eje (con  $y = 0$ ,  $z = 0$ ). a) Sistema de traslación. b) Sistema de rotación (Lawson and Wu, 1997a)

Dicho error de posición crece cuando aumenta la no-uniformidad de la magnificación. El desajuste dependerá de la sofisticación del algoritmo utilizado para proyectar el campo imagen en el plano objeto. Este tipo de error se puede minimizar, pero es virtualmente imposible de eliminar (Prasad 2000). Los errores de posición deterioran más la medida si el flujo está caracterizado por gradientes espaciales significativos.

La disminución de errores de posición puede ser facilitada posicionando marcadores en el campo de interés del flujo. Prasad y Adrian (1993a y b) proponen un método de Moiré para grabar los negativos desde cada cámara. Actualmente lo que más se practica es utilizar un blanco de calibración en el campo del flujo. Dada la importancia de minimizar estos errores, para medidas de PIV se pueden usar métodos de auto-calibración con este objeto. Dichos métodos se describen en el apartado 5.4.3.

## 5.4. Métodos de reconstrucción

Para obtener medidas de PIV, cada visualización en la estéreo-pareja debe de ser interrogada individualmente, por ejemplo utilizando un análisis de correlación. Este proporciona datos de velocidad en una malla cartesiana para cada cámara.

El proceso de mapeo de los desplazamientos desde cada plano imagen al plano objeto y la combinación de estos para la obtención de datos tridimensionales, se llama reconstrucción.

El proceso de reconstrucción puede realizarse por dos caminos distintos:

1. Reconstrucción geométrica
2. Reconstrucción basada en la calibración

La segunda puede ser subdividida en “reconstrucción 2-D por calibración”, donde la calibración simplifica la reconstrucción geométrica, y “reconstrucción 3-D por calibración” en la cual el conocimiento de la geometría del sistema es innecesario.

A continuación se comentan cada uno de estos sistemas así como procedimientos adicionales de reducción de error en la calibración.

### 5.4.1. Reconstrucción geométrica

Para proyectar el desplazamiento desde el plano imagen,  $X$ , al plano objeto,  $x$ , es necesario el siguiente mapeo:

$$x = f(X) \quad 5.4.1$$

En el caso de un sistema de traslación caracterizado por una magnificación uniforme, el proceso de determinación de  $f$  es sencillo.

Contrariamente al caso de la figura 5.2.5, donde se representa un sistema que no está caracterizado por una magnificación uniforme, las áreas sombreadas para un sistema de traslación coincidirán cuando estén mapeadas en el plano objeto. Las ecuaciones 5.2.1-5.2.3 pueden ser utilizadas directamente para combinar los datos después del mapeo. Las cantidades que se requieren de entrada son  $d_0$ ,  $M_n$ ,  $S$ , la posición de ambos sensores en el espacio tridimensional y su orientación. Adicionalmente, se tiene que proyectar con precisión un punto conocido desde el plano imagen hasta el plano objeto (se necesita conocer la posición  $x$  e  $y$  para determinar  $\Delta x$  y  $\Delta y$  respectivamente). Esta técnica de reconstrucción donde se requiere el conocimiento a priori de la geometría completa de grabación se denomina reconstrucción geométrica, como se comentó anteriormente. Su aplicación ha sido llevada a la práctica en sistemas de traslación aplicados a flujos en aire por Arroyo and Greated (1991) y en ensayos en líquidos por Prasad and Adrian (1993a). La reconstrucción geométrica se complica notablemente cuando la grabación esta caracterizada por una magnificación no uniforme.

Prasad y Adrian (1993a, b) realizan una reconstrucción geométrica aplicada a flujos en líquidos, donde las imágenes presentan una variación significativa de la magnificación. Utilizan un enfoque basado en el trazado de rayos o *ray-tracing* para mapear los puntos en el plano imagen, a través de las lentes y una espesa capa líquida hasta el plano objeto (el programa de ray-tracing tiene en cuenta la refracción del rayo en la interfase liquido-gas). El programa requiere como dato de entrada la profundidad de la capa líquida,  $M_n$ ,  $d_0$ , el ángulo de inclinación del plano imagen y también la posición tridimensional de la película en cada cámara.

El programa de ray-tracing mapea los cuatro ángulos de cada malla de interrogación cartesiana en el plano objeto, obteniendo trapezoides parcialmente superpuestos con estiramiento opuesto. Inicialmente se determina el área en común y se inscribe una malla cartesiana. Posteriormente, se



interpolan los datos desde cada malla cartesiana del plano imagen en los puntos de la nueva malla inscrita en el plano objeto. Finalmente, se combinan los datos de cada cámara. No obstante, no se pueden aplicar directamente las ecuaciones 5.2.1-5.2.3. Se tienen que desarrollar ecuaciones modificadas para tener en cuenta la refracción en la interfase gas-líquido (Prasad y Adrian, 1993a). Similarmente, Zang y Prasad (1997) utilizan la reconstrucción geométrica para evaluar el rendimiento del sistema de desplazamiento angular con corrección de Scheimpflug.

La reconstrucción geométrica es posible sólo cuando la geometría de la configuración de grabación es completamente conocida y puede ser modelada matemáticamente. En algunos casos, como por ejemplo si se tiene en cuenta la no linealidad de las lentes, esta modelización es imposible. Además, las ecuaciones 5.2.4-5.2.6 indican que las incertidumbres de un alineamiento impreciso del sistema como  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{M_n}$  y  $\sigma_{d_o}$  pueden aumentar el error de la medida. La condición de Scheimpflug o la presencia de una interfase gas-líquido pueden hacer la reconstrucción geométrica más proclive al error. Consecuentemente, es conveniente tener en cuenta un método de reconstrucción alternativo por calibración que se pueda implementar más fácilmente y que pueda proporcionar resultados más precisos.

### 5.4.2. Reconstrucción por calibración

En este apartado se subdivide la reconstrucción por calibración en métodos de calibración 2-D y 3-D. En la primera, una función de mapeo relaciona cada plano imagen bidimensional con el plano objeto bidimensional. En la segunda, la función de mapeo proporciona una relación directa entre la posición de una partícula en una proximidad 3-D del plano objeto con la posición correspondiente en el plano imagen. Mientras el método de calibración 2-D necesita un conocimiento de la geometría del sistema de grabación para realizar el paso final de aplicación de las ecuaciones de reconstrucción, el método 3-D no necesita esta información. Wieneke (2005) entre otros, propuso un método de calibración basado en el modelo de *pinhole*.

Sin embargo, la mayoría de los métodos por calibración requieren el posicionamiento de un blanco en el plano objeto. El blanco de calibración es usualmente una placa que contiene un conjunto de puntos convenientemente distribuidos en una malla cartesiana, o bien una malla cartesiana con un rayado de líneas negras. El blanco de calibración se tiene que posicionar en la sección de prueba de forma que coincida exactamente con el plano de luz, y debería ser bastante grande como para encuadrar la región de interés durante las medidas del flujo.

La estéreo cámara se alinea en su configuración final, y se inicia la fase de calibración adquiriendo una imagen del blanco de calibración con cada cámara. La posición de los puntos de la malla se obtiene generalmente por ajuste de un patrón predeterminado. El ajuste debe identificar las marcas que representan los puntos de la malla en el blanco original desde ambas vistas. Por ejemplo, en el caso de un blanco que contiene cruces, los puntos de intersección se posicionan con precisión por correlación cruzada con una máscara de correlación (Willert, 1997). El pico de la señal en el plano de correlación se localiza con precisión sub-píxel por una curva de ajuste.

#### Métodos de calibración 2-D

Como se ha dicho antes, la calibración 2-D proporciona un mapeo entre el plano objeto bidimensional y cada plano imagen bidimensional. La calibración 2-D esencialmente substituye el enfoque ray-tracing que se requiere en la reconstrucción geométrica. El resultado de este procedimiento es el grupo de datos de calibración para cada cámara:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{f}(\mathbf{X}_i) \quad 5.4.2$$

Donde  $x_i$  y  $X_i$  son los puntos correspondientes en el plano objeto e imagen respectivamente, e  $i (= 1, 2, \dots, n)$  es un contador para el numero de puntos de la malla en el blanco original. El paso siguiente consiste en determinar la función de mapeo  $f$ . Un mapeo de primer orden de la forma

$$x = M_x X + C_x \quad 5.4.3$$

$$y = M_y Y + C_y \quad 5.4.4$$

no tiene en cuenta el caso de magnificación no uniforme y otras no linealidades ( $M$ ,  $C$  son la magnificación y la traslación respectivamente).

Por lo tanto, Westerweel y van Oord (1999) utilizan un mapeo de segundo orden:

$$x = a_1 X^2 + a_2 Y^2 + a_3 XY + a_4 X + a_5 Y + a_6 \quad 5.4.5$$

$$y = b_1 X^2 + b_2 Y^2 + b_3 XY + b_4 X + b_5 Y + b_6 \quad 5.4.6$$

Los coeficientes  $a_1, a_2, \dots, a_6$  y  $b_1, b_2, \dots, b_6$  se pueden determinar resolviendo las siguientes ecuaciones utilizando la solución de mínimos cuadrados:

$$A \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad B \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad 5.4.7$$

Donde:

$$A = B = \begin{bmatrix} X_1^2 & Y_1^2 & X_1 Y_1 & X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2^2 & Y_2^2 & X_2 Y_2 & X_2 & Y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^2 & Y_n^2 & X_n Y_n & X_n & Y_n & 1 \end{bmatrix} \quad 5.4.8$$

Como resultado, cada punto en el plano imagen puede ser mapeado únicamente en un punto en el plano objeto, y con ello la calibración está completa. El procedimiento puede ser extendido a un orden más alto dado que las ecuaciones a resolver son lineales.

Posteriormente se quita el blanco de calibración y se pasa a la fase de grabación e interrogación de las imágenes estereoscópicas del flujo sobre una malla cartesiana en el plano imagen. Utilizando los mismos coeficientes de mapeo, se proyectan también los datos de desplazamiento desde cada cámara en el plano objeto. Después, los datos se interpolan en una malla cartesiana final en el plano objeto utilizando un algoritmo que interpola los datos desde una malla no cuadrada a una malla cuadrada. Finalmente, los datos se combinan a través de las ecuaciones estándar (expresiones 5.2.1 a 5.2.3) para obtener  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$ .

Willert (1997) presenta dos métodos de mapeo comparando los resultados. La primera técnica mapea un rectángulo en un trapecioide, preservando así la rectitud de las líneas rectas:

$$x = \frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33}} \quad 5.4.9$$

$$y = \frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33}} \quad 5.4.10$$

La segunda técnica utiliza términos de orden más alto y puede compensar por distorsiones adicionales:

$$x = \frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13} + a_{14}X^2 + a_{15}Y^2 + a_{16}XY}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33} + a_{34}X^2 + a_{35}Y^2 + a_{36}XY} \quad 5.4.11$$

$$y = \frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23} + a_{24}X^2 + a_{25}Y^2 + a_{26}XY}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33} + a_{34}X^2 + a_{35}Y^2 + a_{36}XY} \quad 5.4.12$$

En 5.4.11 y 5.4.13,  $a_{33} = 1$ . Willert (1997) utiliza un método no lineal de mínimos cuadrados para determinar los 8 o 17 coeficientes. Willert refiere que el segundo método, pese a su orden más alto, no proporciona resultados notablemente mejores en su caso. Atribuye este resultado a la falta de distorsión geométrica de las lentes. Willert (1997) usa un mapeo imagen-objeto de forma que mapea directamente los campos que contienen las imágenes de las partículas en el plano objeto y efectúa la interrogación PIV en la malla cartesiana final. Posteriormente, se combinan los desplazamientos aparentes vistos desde cada cámara para proporcionar los vectores tridimensionales. A diferencia de otras técnicas de reconstrucción por calibración que interrogan primero y mapean el movimiento en el plano objeto después (Westerweel y Nieuwstadt (1991), Westerweel y van Oord (1999), entre otros).

La reconstrucción por calibración 2-D proporciona los desplazamientos aparentes de las partículas como observados desde cada cámara sobre una malla cartesiana final en el plano objeto sin que sea necesario ningún conocimiento de la geometría de grabación. Sin embargo, el paso final de la determinación de  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  utiliza ecuaciones de reconstrucción (como por ejemplo las 5.2.1-5.2.3) que necesitan algún conocimiento de la geometría como la distancia entre las lentes, la distancia plano objeto-plano de las lentes, la orientación de los ejes de la cámara en respecto al plano objeto etc.

Como se ha mencionado antes, estas magnitudes, que corresponden a la geometría del sistema de grabación, pueden ser difíciles de medir y pueden introducir errores. Además, si la grabación se efectúa a través de una interfase líquido-gas, las ecuaciones han de ser modificadas para tener en cuenta la refracción en la interfase (a menos que se utilicen prismas líquidos para restablecer una grabación paraxial, como en el caso de Westerweel y van Oord, 1999). Estas dificultades inducen a la utilización de métodos de calibración más completos como son los 3-D.

### **Métodos de calibración 3-D**

Este procedimiento, aplicado por Soloff et al. (1997) no requiere conocimiento alguno de la geometría del sistema en ningún estadio de la reconstrucción. Eso ocurre porque el método 3-D adquiere datos de calibración en tres posiciones  $z$  distintas: el blanco de calibración se posiciona (i)

en el plano objeto, (ii) detrás y paralelamente al plano objeto, (iii) delante y paralelamente al plano objeto. La separación en  $z$  entre los planos de calibración ha de ser comparable con el espesor del plano de luz.

La relación entre la posición  $\mathbf{x}$  en el campo-objeto tridimensional y su campo imagen bidimensional  $\mathbf{X}$  puede escribirse como:

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) \quad 5.4.13$$

Donde  $\mathbf{F}$  puede ser aproximada con la siguiente expresión polinómica (Soloff et al., 1997):

$$\begin{aligned} \hat{F}(\mathbf{x}) = & a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_1x_2 + \\ & + a_6x_2^2 + a_7x_1x_3 + a_8x_2x_3 + a_9x_3^2 + a_{10}x_1^3 + \\ & + a_{11}x_1^2x_2 + a_{12}x_1x_2^2 + a_{13}x_2^3 + a_{14}x_1^2x_3 + \\ & + a_{15}x_1x_2x_3 + a_{16}x_2^2x_3 + a_{17}x_1x_3^2 + a_{18}x_2x_3^2 \end{aligned} \quad 5.4.14$$

En esta expresión los coeficientes  $\mathbf{a}_i$  se determinan por un método de mínimos cuadrados: se necesitan 4 grupos de  $\mathbf{a}_i$ , uno por cada  $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_2^{(2)}$  y  $X_1^{(2)}$ , donde los superíndices denotan las cámaras 1 y 2. En la ecuación (5.4.14), por comodidad se utilizan  $(x_1, x_2, x_3)$  para representar las coordenadas físicas en lugar de  $(x, y, z)$ , y  $(X_1, X_2)$  para las coordenadas en el plano imagen  $(X, Y)$ . El polinomio es cúbico en  $x_1$  y en  $x_2$  y cuadrático en  $x_3$  (en esta calibración se utilizan tres planos  $z$ ; planos adicionales en  $z$  permiten términos en  $x_3$  de mayor orden).

Siguiendo el análisis de Soloff et al. (1997), el movimiento de las partículas en el plano imagen

$$\Delta X = F(x + \Delta x) - F(x) \quad 5.4.15$$

se puede aproximar como

$$\Delta X \approx \nabla F(x) \Delta(x) \quad 5.4.16$$

donde

$$(\nabla F)_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j} = F_{ij}$$

con  $i = 1, 2$  y  $j = 1, 2, 3$ . Consecuentemente,

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1^{(1)} \\ \Delta X_2^{(1)} \\ \Delta X_1^{(2)} \\ \Delta X_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1,1}^{(1)} & F_{1,2}^{(1)} & F_{1,3}^{(1)} \\ F_{2,1}^{(1)} & F_{2,2}^{(1)} & F_{2,3}^{(1)} \\ F_{1,1}^{(2)} & F_{1,2}^{(2)} & F_{1,3}^{(2)} \\ F_{2,1}^{(2)} & F_{2,2}^{(2)} & F_{2,3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix} \quad 5.4.17$$

Los desplazamientos tridimensionales quedan determinados por la expresión 5.4.17. Esta ecuación repite lo que se observaba en los apartados 5.1 y 5.2, o sea que la configuración estereoscópica proporciona cuatro ecuaciones con tres incógnitas.

En configuraciones estereoscópicas simétricas, consideraciones sobre la simetría del sistema revelan que la segunda y cuarta ecuaciones en 5.4.17 suelen ser promediadas para aumentar la

precisión de  $\Delta x_2$ , como se indica en el párrafo 5.2.1. En situaciones más generales, la ecuación 5.4.17 se puede resolver con un método de mínimos cuadrados (Soloff et al., 1997).

La técnica seguida por Soloff et al. (1997), no necesita a priori ninguna información sobre la geometría del sistema de grabación: es, consecuentemente, utilizada en el caso de geometrías que no se pueden modelizar fácilmente de forma matemática.

Este método ha sido aplicado también por Hill et al. (1999), que utilizaron cinco planos  $z$  para la calibración en lugar de los tres utilizados por Soloff et al (1997) y por Bjorkquist (1998) que empleó nueve planos  $z$  separados por 0,5 mm.

### 5.4.3. Reconstrucción por Auto-Calibración utilizando imágenes de partículas

Hasta ahora se han descrito métodos de calibración que necesitan una alineación exacta del blanco de calibración con el plano de medida, condición que en general presenta dificultades. Ante esto, Willert (1997) propuso un método de corrección basado en la correlación cruzada entre las imágenes de partículas de las cámaras 1 y 2.

Uno de los límites de los métodos descritos hasta ahora, se presenta a la hora de obtener una función de mapeo volumétrica, para mapear todos los  $x, y, z$ -world-points o puntos del mundo real sobre las localizaciones  $x, y$  en píxeles de una o más cámaras. Normalmente se utiliza un modelo de pinhole al que se le añaden parámetros adicionales para tener en cuenta las lentes y otras distorsiones (Tsay, 1986). En conjunto, los parámetros a considerar son los externos de traslación y rotación (6 parámetros) y los internos a la cámara como la distancia focal, el punto principal (es decir el punto en el CCD del eje óptico), la dimensión del pixel y los parámetros de distorsión de las lentes.

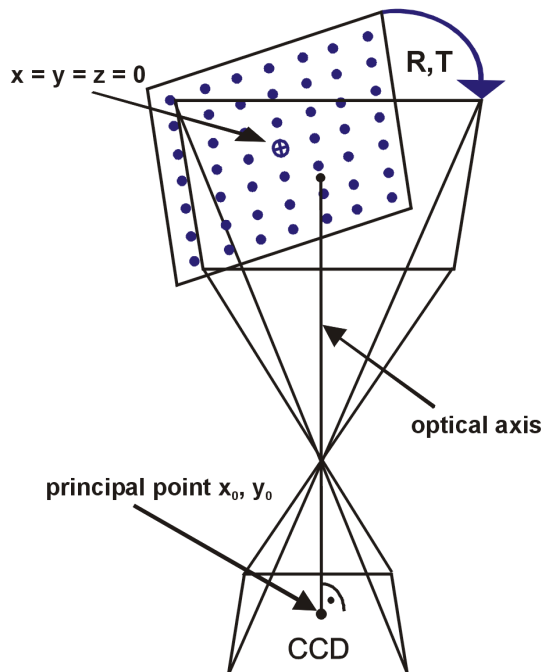


Figura 5.4.1: Modelo de pinhole (Wieneke, 2005)

Wieneke (2003 and 2005), Fournel et al. (2003) y Fournel y Coudert (2003), entre otros, propusieron un método de auto-calibración que utiliza dicho modelo del pinhole. La ventaja principal de ese método, que se aplicará en esta Tesis en el análisis de las imágenes reales, es la

capacidad de proporcionar correcciones de las funciones de mapeo cuando el blanco de calibración está desalineado por alejamiento o inclinación respecto al plano de medida (plano láser).

### Calibración con el método del pinhole

Como ya se ha visto en los párrafos anteriores, en el caso del PIV estereoscópico, se necesita determinar 2 funciones de mapeo,  $M_1$  y  $M_2$  para las cámaras 1 y 2, que relacionen las coordenadas del mundo real o universales (WCS: *world coordinate system*, se usará esta abreviación de ahora en adelante)  $X_w = (X_w, Y_w, Z_w)$  a las coordenadas en píxeles en el plano imagen de las cámaras  $x_1 = (x_1, y_1)$  y  $x_2 = (x_2, y_2)$  (figura 5.4.1):

$$x_1 = M_1(X_w) \quad \text{y} \quad x_2 = M_2(X_w)$$

El modelo de pinhole proporciona un mapeo completo del volumen como el especificado en las ecuaciones anteriores. Siguiendo el modelo de Tsai de 11 parámetros. Los 6 parámetros de la cámara vienen dados por la rotación  $R$  y la traslación  $T$  de las coordenadas reales universales WCS  $X_w$  a las coordenadas de la cámara  $X_c = (X_c, Y_c, Z_c)$ :

$$X_c = R \cdot X_w + T$$

Las posiciones no distorsionada y distorsionada de la cámara  $x_u = (x_u, y_u)$  y  $x_d = (x_d, y_d)$  están computadas con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} x_u &= f \cdot X_c / Z_c & \text{y} & & y_u &= f \cdot Y_c / Z_c \\ x_d &= x_u (1 + k_1 \cdot r) & \text{y} & & y_d &= y_u (1 + k_1 \cdot r) \end{aligned}$$

donde  $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ ;  $k_1$  es el término de distorsión radial de primer orden y  $f$  es la distancia focal, es decir la distancia entre el punto principal y el pinhole de la cámara. Aunque no difieran mucho, este número no coincide con la distancia focal de la lente  $f_{lens}$ . La relación entre las dos distancias focales, si se considera que el blanco de calibración esté enfocado a una distancia  $T_z$ , es:

$$f = f_{lens} (1 + f_{lens} / (T_z + f_{lens}))$$

aunque en la práctica esta ecuación tendría que ser modificada según el tipo de lente. Las desviaciones son del orden de 2-5% para lentes buenas.

Finalmente la posición real del pixel  $x = (x, y)$  en el chip del CCD se calcula como:

$$x = S_x x_d / S_{pixel} + x_0$$

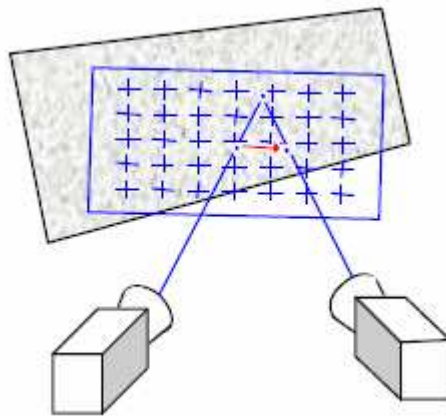
$$y = y_d / S_{pixel} + y_0$$

$S_x$  es el factor opcional de inclinación o, en ingles, *skew*, igual a 1 en el caso de píxeles de forma cuadrada. Alternativamente,  $S_x$  se puede usar como término adicional de distorsión.  $S_{pixel}$  es la dimensión del pixel (magnitud conocida del problema). Por las ecuaciones de arriba se puede ver que el factor relevante es la relación  $f / S_{pixel}$ .  $(x_0, y_0)$  representa el punto principal del eje óptico sobre el CCD. El eje óptico está definido como la perpendicular al chip del CCD y pasante por el pinhole. El punto principal se encuentra normalmente cerca de la mitad del chip del CCD a menos de que se utilice un adaptador de Scheimpflug. El conjunto de parámetros  $(f, S_x, k_1, x_0, y_0)$  constituye los 5 parámetros internos a la cámara del modelo de Tsai.

### Corrección de la función de mapeo

Una forma de verificar la alineación del blanco de calibración con el plano de medida, es deformar las imágenes de las dos cámaras con su correspondiente función  $M^I$  y comparar ambos resultados. Teóricamente las dos imágenes deberían corresponderse perfectamente. Cada desviación, representable en un “mapa de discrepancia”, es una indicación de alguna desalineación que puede llevar a distintos tipos de error. Si el blanco de calibración presenta un offset en la coordenada  $z$  con respecto al plano de medida, la reconstrucción de las tres componentes del vector por medio de los dos mapas 2C, utiliza vectores calculados en posiciones distintas en el plano de medida. Si, por ejemplo, se presenta un offset de 20 píxeles y un gradiente de velocidad del 5%, el desplazamiento cambia en un 1 píxel para una distancia de 20 píxeles, lo que comporta un error considerable en el campo 3C de vectores. Adicionalmente una rotación de un grado del plano de calibración con respecto al plano de medida se refleja en un campo 3C también rotado en un grado.

El método propuesto por Wieneke (2005) consistente en utilizar el mapa de discrepancia para corregir la función de mapeo, ha sido aplicado anteriormente por Willert (1997) y de forma similar en el caso de lentes telecéntricas (Fournel et al., 2003) y de lentes normales con adaptadores de Scheimpflug (Fournel T, Coudert T; 2003). De forma similar Wieneke (2005) propone un método que consta de varios pasos.



**Figura 5.4.2:** Los *world points* del plano láser se pueden computar por triangulación utilizando el mapa de discrepancia (Wieneke, 2003).

En primer lugar se reconstruye un mapa de discrepancia de las 2 imágenes no distorsionadas por medio de un PIV estándar de correlación. Debido a la dispersión de partículas en el ancho del plano láser, el patrón de partículas en cada ventana de interrogación aparece ligeramente distinto al verse desde una cámara o la otra. Consecuentemente, en vez de correlacionar solamente una pareja de imágenes, es conveniente utilizar un algoritmo de promedio que suma los distintos planos de correlación de un cierto número de parejas de imágenes. Dependiendo de la densidad de partículas y del ancho del plano láser, se recomiendan entre 5 y 50 imágenes para una correcta evaluación del mapa de discrepancia. El algoritmo presentado por Wieneke y aplicado en el software comercial utilizado en este trabajo de Tesis, utiliza un PIV con deformación de la ventana de interrogación para aumentar la precisión en la evaluación del campo vectorial: las  $n$  imágenes se procesan para obtener una primera evaluación del mapa de discrepancia, este mapa se usa como campo vectorial de referencia para desplazar y deformar las ventanas de interrogación en el paso sucesivo y así en las distintas iteraciones.

Una vez completado el mapa de discrepancia, éste se utiliza para calcular para cada vector el punto correspondiente en el plano de medida por medio de un método de triangulación (Hartley R,

Sturm P; 1994), representado en figura 5.4.2. Las dos líneas re proyectadas desde cada cámara para cada punto no se intersecan en un solo plano del sistema real universal, esta mínima variación se puede usar como criterio para eliminar falsos vectores de discrepancia, utilizando, por ejemplo, un umbral de 5 píxeles.

El paso sucesivo consiste en ajustar el plano utilizando esos puntos en un espacio 3D y las funciones de mapeo de las cámaras 1 y 2 se corrigen por medio de una transformación tal que el plano de medida ajustado coincida con  $z = 0$ .

Esto se hace sustituyendo en la ecuación  $Xc = R \cdot X_w + T$ ,  $R$  con  $RdR$  y  $T$  con  $T + RdT$ , donde con  $dR$  y  $dT$  se indican respectivamente la rotación y la distancia del plano de ajuste con respecto al blanco de calibración. La libertad de elección del nuevo sistema de coordenadas se reduce al fijar el nuevo origen como el punto proyectado desde el origen previo de la cámara 1 sobre el plano de medida y el eje  $x$  previo de la cámara 1 como el eje  $x$  del plano de medida. Esto puede ser cambiado posteriormente por el usuario para fijar un nuevo origen y el eje  $x$  o  $y$  en una imagen de partículas no deformada.



## **6. DEVELOPEMENT OF THE COMBINED STEREO-LFC PIV SYSTEM AND TOPICS TO EVALUATE**

The previous two chapters focus on each of the two research branches that have to be combined to obtain the system which is the primary purpose of this PhD Thesis.

- Chapter 4 aims at the description of the conventionally named “advanced algorithms” that deal with the improvement of PIV, when it is configured for measuring the two in-plane components of the velocity (2D-2C PIV). The main objectives of these algorithms are the increase of the spatial resolution, the ability to cope with large displacement gradients and an enhancement of the robustness (i.e. capability to avoid outliers) when dealing with reduced signal to noise ratios.
- Chapter 5 is intended to give an exhaustive detailed picture of the Stereo-PIV technique. This technique combines the information of different perspective views of the field under study to obtain the three components of the velocity (2D-3C PIV).

Both are results of the recent advances on Particle Image Velocimetry (PIV).

The combination of these two branches is a domain that has not been fully explored. In particular, this is the first work intended to use the LFC-PIV algorithm in a stereoscopic setup as far as the knowledge of the author. This chapter develops such combination and indicates the main topics to consider in order to evaluate its advantages. Chapters 7 and 8 explore its performance in order to define its capabilities.

In the frame of Stereo-PIV and taking into account that spatial resolution is an objective often pursued by “advanced algorithms”, a consideration has to be raised. Usually in Stereo-PIV measurements the laser sheet is thicker than in 2D-2C PIV. When the structures to be described are in the order of this thickness they might not be resolvable, basically because of the overlapping of information along the line of view of the cameras. However, in the development of this PhD Thesis, some situations in which small scale structures are resolvable and of interest have been found. Subsection 6.3 further details this point.

These observations indicate that the spatial resolution (one of the most highlighted abilities of LFC-PIV) can be of interest or not depending on the flow field under study. Besides this, two other advantages are commonly of interest in any complex flow field (robustness and the ability to cope with large displacement gradients). As they are less commonly addressed, some insight on both has to be performed:

The ability to cope with large particle displacement gradients, among other possibilities, allows increasing the time between images ( $\Delta t$ ). This usually reduces the effect of subpixel accuracy limitations (better measurements with the same subpixel accuracy).

The enhancement of robustness has a particular interesting role when dealing with the out-of-plane loss of particle pairs, very frequent in 3D flows. Again, ability to cope with large percentages of particle image losses allows increasing  $\Delta t$ .

Defining the limits on the capability to cope with large gradients and out-of-plane loss of particles in 2D3C LFC-PIV seems interesting. It allows designing experiments or deciding on the need to introduce advanced algorithms in a Stereo PIV measurement. In this Thesis these limits are explored using synthetic images (chapter 7). In addition, the coherence of those results with the ones obtained when analyzing real images is also checked (chapter 8).

In order to combine the stereo technique and the Local Field Correction PIV different available software have been studied. It was found that La Vision commercial software allows for interactive

communication using a macro language similar to ANSI C. In this environment, tools could be programmed to use the calibration and 3C vector reconstruction algorithms on externally calculated vector fields. In particular, it could be used to extend to 3C the measurement from sets of stereo couples of 2D images analyzed by the in-house LFC algorithms.

This was considered to be an optimum strategy as it allows comparing results from multigrid and LFC over the same basis for 3D spatial location.

## 6.1. Descriptions of the tools for the Stereo-LFC PIV set-up, calibration and 3D reconstruction

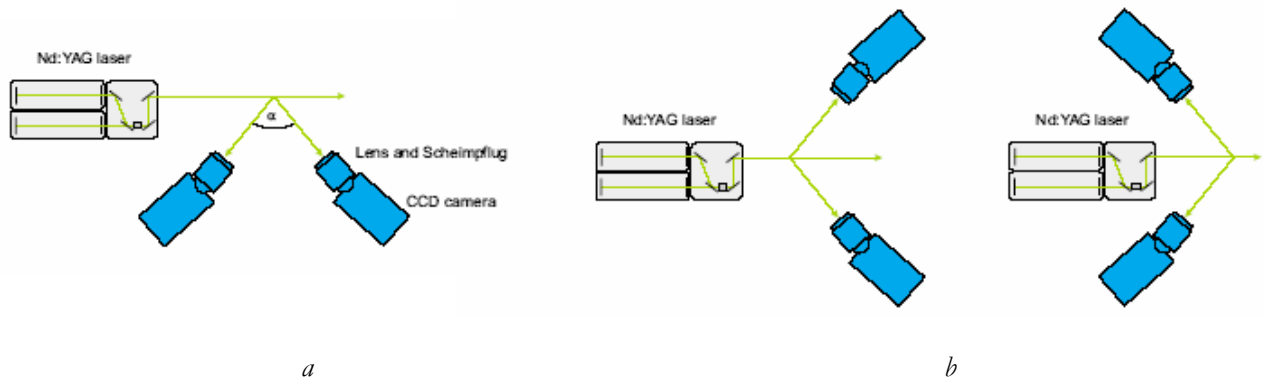
To implement the Local Field Correction algorithm in a Stereo configuration, the image acquisition has to be performed using a spatial calibration. Afterwards algorithms for 3D reconstruction have to be applied. For these tasks commercial algorithms from La Vision (La Vision Manuals, 2002 and 2006) were adapted to be used on LFC calculations. In addition to this, the evaluation of the new combination proposed in this PhD Thesis includes a comparison of its results with the ones obtained with the commercial software created by La Vision. The version used is the DaVis 7.0 (La Vision, 2006) and it consists basically in a Multigrid PIV enhanced with image distortion and which uses vector smoothing between iterations to reduce the instabilities.

In the following sections further details on the principal characteristics of the commercial software and the way of implementing the Local Field Correction PIV in a Stereo configuration within this PhD Thesis are described.

### 6.1.1. Arrangements of the cameras

Depending on the optical access to the area of interest there are different possibilities to arrange the stereo PIV system, as specified in Chapter 5. In that chapter the particular characteristics of the different possible stereo configurations have been underlined.

In the case of choosing a backward-forward scattering configuration (fig. 6.1.1 a) one camera is recording the light scattered in forward direction while the second camera is recording the scattered light in backward direction. As consequence of this, the intensities detected with both cameras with the same f-number of the camera lens is different (typically a factor 10 between backward- and forward direction), so usually the camera viewing in backward scattering direction needs a larger aperture. This problem is not present when choosing a forward-forward or backward-backward scattering configuration (Fig. 6.1.1 b).



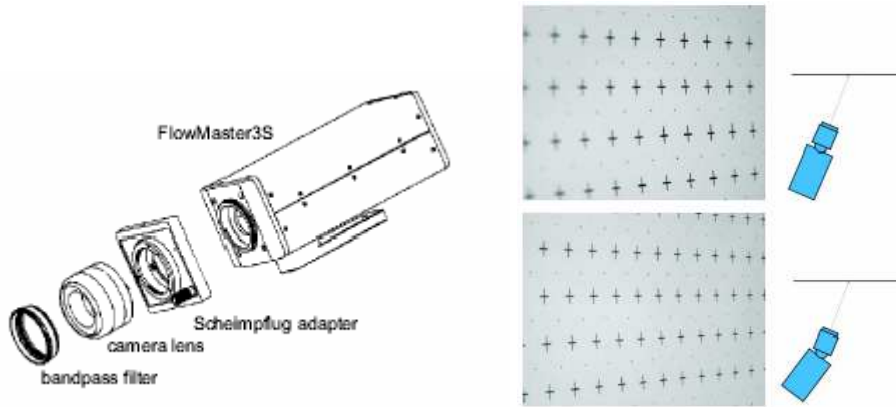
**Figure 6.1.1:** Cameras arrangement: **a)** backward-forward scattering configuration **b)** forward-forward or backward-backward scattering configuration respectively (La Vision, 2006)

The measurement precision of the out of plane component increases as the opening angle between the two cameras reaches 90°.

One problem of an oblique viewing direction is the limited depth of field. This can be accommodated by additionally tilting the image plane in respect to the orientation of the camera lens and light sheet according to the Scheimpflug criterion. As already specified in the previous chapter, the Scheimpflug condition impose that the image plane, the lens plane and the object plane intersect in a common line. Unfortunately this arrangement has the side effect of introducing a strong perspective distortion. The factor of magnification is no longer constant across the complete field of view and needs additional calibration.

The standard LaVision Scheimpflug adapter can be arranged between camera mount and camera lens (Figure 6.1.2 left hand side). The separation of camera principal plane and CCD chip corresponds exactly to the back-focal length of a standard Nikon camera lens. Using Allen screws the Scheimpflug adapter can be aligned in arbitrary orientation depending on the camera viewing direction.

The fine adjustment of the Scheimpflug adapter is done empirically. The calibration plate should be arranged in the light sheet position. To proceed with the adjustment it is convenient to select a large aperture of the camera lens (i.e. small #f-number). The large aperture reduces the depth of field and makes the alignment more sensitive. The camera lens should be focused in the middle of the area of interest. When the Scheimpflug adapter is not properly aligned, only a narrow vertical band of the image is in focus. Tilting the Scheimpflug adapter to the correct direction, according to the Scheimpflug criterion, results in a wider focused range. This procedure should continue while the in focus area is increasing. Eventually refocusing and adjustment of the camera viewing direction becomes necessary. The procedure stops as soon as the complete area of interest is in focus. After that a suitable aperture for the image acquisition can be selected. A reduction of the aperture will even increase the focused area as the depth of field increases.



**Figure 6.1.2:** Left: the Scheimpflug adapter. Right (top- bottom): adjustment of the adapter (La Vision, 2006).

### 6.1.2. The empirical calibration process

A previous step to the recording of Stereo PIV images and the calculation of 3C vectors is to perform a calibration of the two cameras. Correcting for off-axis viewing is an essential part of stereoscopic 3C-PIV evaluation and must be done with great care to ensure accurate results.

The commercial software from LaVision employs a fully empirical calibration method, which does not involve measuring angles or distances. To do this a 3D calibration plate is used (Fig. 6.1.3). At each side, it consists of two z-planes with 1 mm distance spacing and marked with either crosses or spots in each plane. The advantage of this geometry in respect to the flat calibration plates is that it does not need to be moved to obtain a shift from  $z = 0$  to  $z = dz$  for spatial calibration. This avoids the errors associated to the physical shift.



**Figure 6.1.3:** The 3D calibration plate (La Vision, 2006).

Another useful algorithm when dealing with the spatial calibration software is the possibility to employ a self calibration to further increase the accuracy of the operation. This is done with the pinhole method already described in the previous chapter (Wieneke, 2003; Fournel et al., 2003; Fournel and Coudert, 2003). Its application has produced satisfactory results in the analysis of the real images. It is especially important when dealing with small details of the flow as it reduces uncertainties in the location of corresponding vectors between one view and the other. All processing presented in chapter 8 are performed including this algorithm.

### **6.1.3. 3C vector reconstruction**

Once the calibration has been performed, one can proceed to the Stereo-LFC PIV measurement itself. In order to precisely define the way this is completed, a first description of how the software proceeds in the multigrid approach is commented. Afterwards, the variation implemented for the LFC approach is detailed.

In both approaches, two stereo couples of images are acquired (or generated in the case of synthetic ones). In the case of a cross correlation based planar PIV, it is possible to correct the image according to the calibration and then calculate the velocity vector field. This is, in principle, possible with Stereo-PIV as well, but it is not implemented by the La Vision software, as they state that a prior correction of the image introduces an additional error that has been estimated around 0.5 pixels. The alternative to this processing is to calculate the vectors on the image affected by the perspective view and correct the result (vector and location) according to the calibration.

For the case of the Multigrid approach, from the four frames of the stereo couple, the 3-component vectors are calculated in the following way (illustrated in figure 6.1.4):

1. An empty vector buffer is set up with size corresponding to the size the image would have when its distortion is corrected by the usual image correction function. The final size of the vector buffer is given by the maximum overlap of the images from camera 1 and 2.

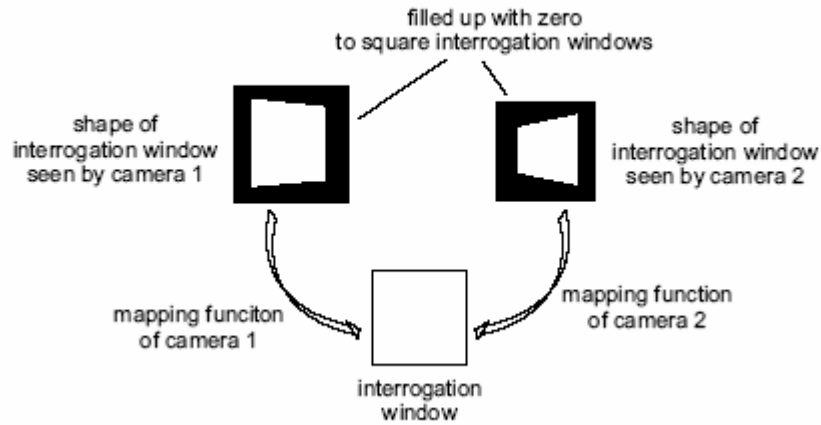


Figure 6.1.4: Calculating the interrogation window (La Vision,2006).

2. For each vector position the corresponding position of the interrogation window in the raw image is calculated for images from both camera 1 and 2.
3. These four interrogation windows (cross-correlation) are used for calculating a 2D-vector both for camera 1 and 2.
4. The true 3-component vector is reconstructed from the two vectors of camera 1 and 2, effectively using the local viewing angle and orientation obtained from the calibration.

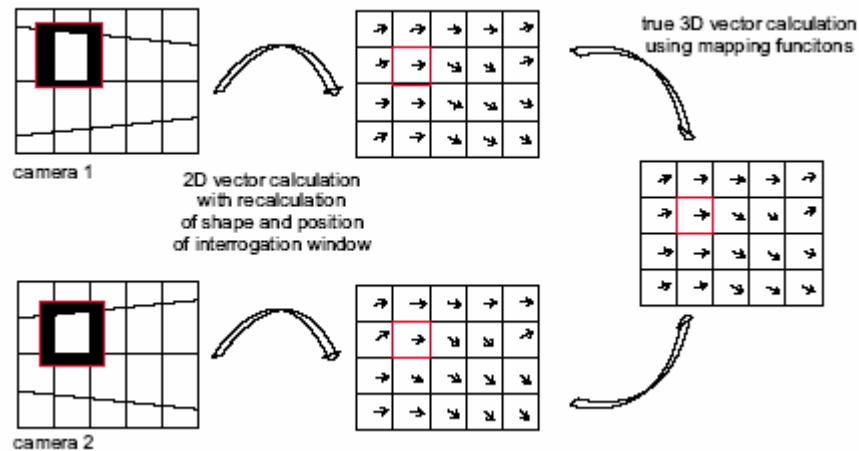


Figure 6.1.5: Calculating vectors scheme (La Vision,2006).

This means that three vector components  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  are computed from four components ( $V_{x1}$ ,  $V_{y1}$  from camera 1 and  $V_{x2}$ ,  $V_{y2}$  from camera 2) using the transformation as defined by the mapping functions for camera 1 and 2 (figure 6.1.5).

This system of equations is over determined (reduction of 4 values to 3) and allows an additional check if the computed vector is valid. The linear equation system is solved via normal equation and the remained degree of freedom error should be less than 2 or 3 pixel, otherwise the corresponding vector is eliminated.

For the case of the LFC approach, the weighting window would produce a complex phenomenology if it is required to deform as a function of the perspective. Consequently a more simple methodology has been chosen. The vector field is calculated over a regular grid for the two realizations of each stereo couple as usual 2D PIV. The result obtained is interpolated to relocate the vector field information to the correct positions and feed step 4 of the previous scheme. The

auxiliary interpolation may introduce additional errors in respect to the Multigrid approach. Chapter 7 allows to state that such errors are not large enough to impair the improved results obtained with the Stereo-LFC PIV implemented in this way.

## 6.2. Inclusion of the LFC-PIV algorithm in the process

Special care was needed to locate the 2D-2C vectors of each LFC analyzed view into the reference frame of the commercial software.

Computer programs had to be developed for the harmonization between operations performed by the in-house routines and the commercial ones in the Stereo LFC-PIV. In particular the following operations were needed:

- Cutting the experimental image sets for the appropriate LFC analysis. This operation is accomplished considering the selected vector grid distance and the location of the regularly spaced nodes needed for the output.
- Analyzing series of images with the available LFC algorithms. When trying to modify the software for this task, an infinite loop was found to appear randomly for about one out of 20 images. Along the operations performed to identify and solve this problem, some bugs within the original algorithms have been located. Two of them dealt with the management of the C-language pointers to the memory both generated no errors in the processing but did not permit the use of debugging facilities. After solving these difficulties, a third bug was identified as the one generating the infinite loop. This one was related with the conditions that allowed the validation loop to end and consequently the successive iterative step to start. The results calculated before this identification and solution where valid, as this problem in the processing only meant an impossible condition that blocked the processing. It was not related to wrong calculations in the results obtained in the occasions that the bug did not block the processing. The program was modified so that conditions for the convergence in the validation loop where reached allowing proper serial processing.
- Formatting the LFC output with the correct reference locations to allow analysis with the calibration implemented in the commercial software.
- Macros to apply the 3C reconstruction to a series of 2C vector fields and save the corresponding 2D 3C vector maps. This way, the true 3-component vector is calculated from the two vectors of camera 1 and 2, effectively using the local viewing angle and orientation (information contained in the calibration) as described in the previous section.

The possibility of the author to interact with the original programmer and his help in part of these tasks had an important role in the development of this combination and it is greatly appreciated. The source code for LFC processing was 3000 lines long before this PhD Thesis and it is now 3500, being a complex task to familiarize with it in order to analyze and change it.

As specified in Chapter 4, the most relevant difference in the vector calculation is the implementation of a specific weighting function (figure 6.2.1):

$$v^2 = 3 \left( 4 \left| \frac{y}{F} \right|^2 - 4 \left| \frac{y}{F} \right| + 1 \right); \quad r = \frac{6}{\pi^2 \phi_y^2 F^2} \left( 1 - \frac{\sin(\pi \phi_y F)}{\pi \phi_y F} \right) \quad 6.2.1$$

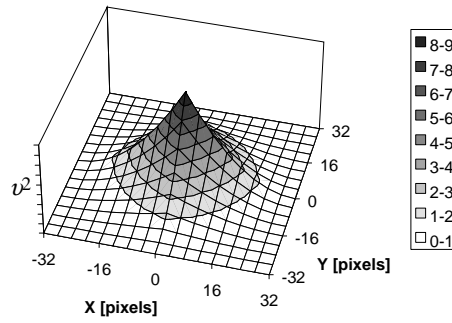


Figure 6.2.1: The LFC weighting function (Nogueira et.al, 2005)

The use of this weighting function by the LFC algorithm has relevant consequences when used in an image distortion iterative process. Differently to the usual multigrid PIV algorithms without weighting, this kind of weighting functions allow for iterative processing without instabilities as it does not produce negative frequency response all along the frequency domain (Nogueira et al., 2005). This means that the smoothing of the result between iterations, used in the usual multigrid approach to avoid instability, is not needed for LFC. In addition, large overlapping values can be used, resulting in a spatial resolution below the size of the interrogation window.

As a consequence, in iterative processes, the philosophy of LFC is to measure the residual error at each iteration in order to correct it. Thanks to the frequency response of these weightings that does not have phase reversal, this is done using large interrogation windows and large values of the overlapping.

In the multigrid approach, attempts to measure the error at frequencies with negative response results in the triggering of instabilities. In consequence, the philosophy of the iterative procedure relies mainly in the smoothing between iterations to reduce the error instead of on its measurement. The size of the interrogation window is reduced along the iterative process to increment the spatial resolution while using moderate values for the overlapping.

These different concepts indicate three relevant aspects to compare the performances of both types of processing:

- The ability to reduce error from previous iterations by measurement instead of smoothing.
- The ability to obtain high resolution with large windows instead of small
- Ability to cope with difficulties in the measurements, as both previous issues, is linked with robustness and the performance of iterations after the incidence of outliers.

The way to evaluate these aspects and the expected frequency responses are further commented in sections 6.3 and 6.4.

### 6.3. Key factors to consider

As anticipated in the introduction of this chapter, for particular flow conditions and experimental setups, some of the advantages of the advanced PIV algorithms might not be useful when used in a stereo setup. An example of this can illustrate the point. For convenience, the lengths in this example will be expressed in pixels. Consider a flow of homogeneous turbulence and laser sheet width thicker than 30 pixels. Within such a scenario, the presence of vortices of scales smaller than  $\sim 30$  pixels would generate velocity gradients within the line of view of each camera. Contemporary Stereoscopic PIV techniques would not be able to reconstruct this information. The consequence for such an experimental setup is that only scales significantly larger could be properly assessed in the measurement.

In this example the improved resolution of an advanced algorithm like the Local Field Correction PIV (LFC-PIV) (Nogueira et al. 2001a), that is able to extract in-plane flow features in the order of 25 pixels size with 10% errors (Lecuona et al. 2004), could be useless. This is mainly due to the out-of-plane overlapping of information, when there are gradients in the line of view directions.

Figure 6.3.1 depicts the concept. The left-hand side of the image shows a small vortex which characteristic length is comparable to the laser sheet width and whose axe is parallel to the laser sheet. The overlapping of information in the image when there are gradients in the line of view directions make the structure non resolvable.

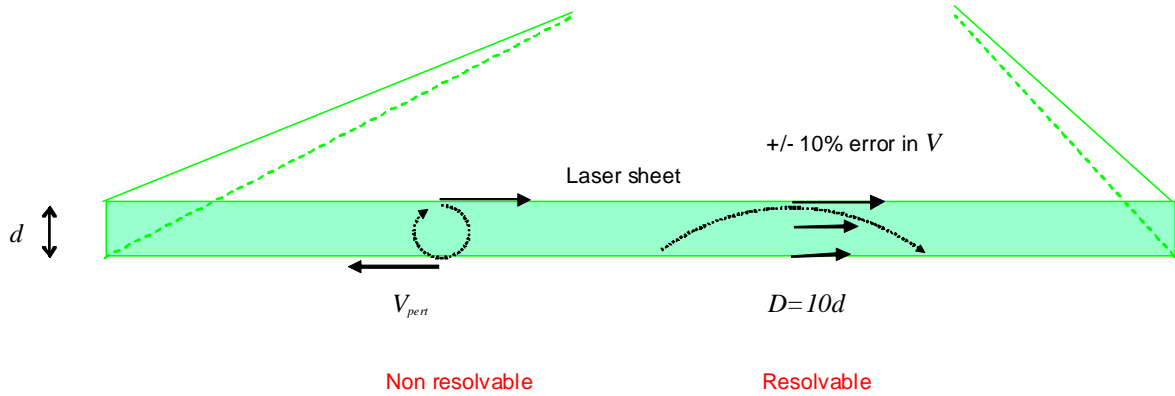


Figure 6.3.1: Resolvable vs. non resolvable structures

This aspect enlightens the interest of studying the performance of Stereo-PIV algorithms when only large scale features (Figure 6.3.1 right-hand vortex) are present as one possible scenario to take into account.

Nevertheless, one aspect must be highlighted in this situation. Advanced algorithms, which consist of several iterations with image distortion in the process, introduces errors of small scales (for example as a result of the presence of outliers). So even analyzing large scales, the resolution capabilities of the different algorithms might still be of interest in the study proposed. This issue will be further deepened in section 6.4.2 and in chapter 7.

Still other situations, like the one depicted in figure 6.3.3, show the necessity of studying the suitability of advanced stereo techniques when small scales are present.

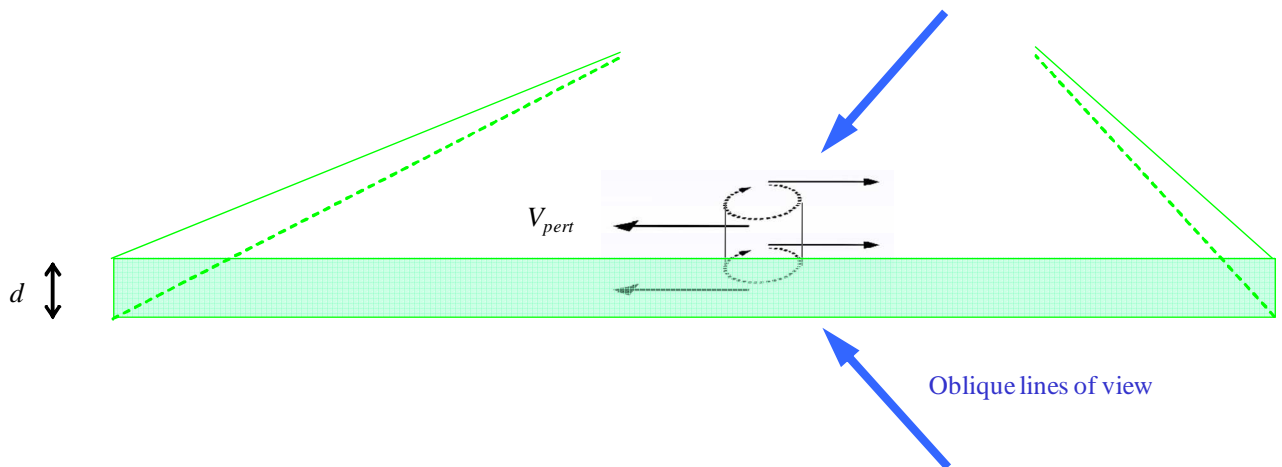


Figure 6.3.2: Small scales resolvability

In this case the axis of the structure is orthogonal to the laser sheet, arising this way the questions of which scale is physically solvable and what is the proper algorithm to use.



Both large and small scales have been characterized using synthetic images in chapter 7, and to further backup on this aspect, the measurements with Stereo- LFC PIV of small scale features in real images is included in chapter 8. Besides that, discussion is offered about the ability to cope with large displacement gradients and about robustness, especially when dealing with the out-of-plane loss of particle pairs. Better performance in both capabilities allows increasing the time between laser pulses and, as a consequence, the dynamic range of the velocity measurement for a given subpixel accuracy is increased, as commented at the beginning of this chapter.

Evaluating the different advanced algorithms for different scale structures and with different interrogation window sizes and grid distances, raises some issues that are summarized in table 6.3.1. In the case of large scales structures both algorithms are able to perform good measurement as the flow scale is larger than both the interrogation window dimension and the grid distance ( $L_F \gg L_W$  and  $L_F \gg L_{GRID}$ ). Still the effect of the occurrence of small scales errors in the iterative process previously commented will be analyzed.

	Cases under study	Flow scale vs. interrogation window dimension	Flow scale vs. grid distance (Nyquist criteria)
1	Large scales $R_0=83$ pix	$L_F \gg L_W$	$L_F \gg L_{GRID}$
2	Small scales $R_0=28$ pix	$L_F \sim L_W$	$L_F \sim L_{GRID}$
3	Small scales $R_0=28$ pix	$L_F < L_W$	$L_F \sim L_{GRID}$

**Tab. 6.3.1**

In the second case, when  $L_F \sim L_W$  and  $L_F \sim L_{GRID}$  it is interesting to evaluate where and for which algorithm resolution difficulties starts to appear.

The last case presents a situation in which only an algorithm without negative amplitude frequency response can resolve the flow scales.

These aspects are relevant for the evaluations on synthetic and real images of the next chapters.

## **6.4. Error analysis: considerations**

To answer the questions raised in the previous section, an error characterization, like the one performed in the next chapter, is necessary. Here some issues regarding that characterization are clarified.

### **6.4.1. Integration time error vs algorithm error**

When analyzing the capability of a PIV algorithm to extract measurements from a PIV image set, it is convenient to differentiate errors coming from the algorithm and errors already contained in the PIV image set. In this sense, the integration time error is discriminated from the algorithm error along the evaluations performed and described in chapter 7.



**Figure 6.4.1:** **a)** correct trajectory to evaluate (pink) and true velocity in a point (green) versus **b)** measured velocity (green) and corresponding trajectory (pink)

The integration time error corresponds to the difference between:

1. The real velocity corresponding to the trajectory of a particle seeded in the flow and that would go through the measurement location (indicated in figure 6.4.1 a by a cross) and
2. what can be inferred by a perfect algorithm from the vector connecting the two images out of the two pulses of the laser for a particle pair that has its midpoint at the location of the measurement even if the trajectory does not pass over that point (figure 6.9 b).

This error is generally larger for larger time between laser pulses, depending also on the particular flow field (e.g. it is different for shear flows than for rotating ones). Once the time between laser pulses is set and the PIV image is taken, the real trajectory of each particle is lost and cannot be recovered by any type of measurement algorithm.

The knowledge of the flow field in a synthetic image allows presenting the results discriminating between the error due to the chosen type of algorithm and the total error, considering it as the combination of the algorithm error and the integration time error.

### 6.4.2. Frequency response

Along the characterizations of the next chapter, the frequency response of the different algorithms under study is often addressed. This subsection indicates the response corresponding to a situation after a first hint of the flow field is obtained. For the Multigrid approach it corresponds to the last two iterations, considering the response of the interrogation window and smoothing as moving averages. For the LFC approach some variants that include smoothing and change in the interrogation window size can be used at the very beginning (Nogueira et al 2001) but, once the initial hint of the flow field is established, the measurement is done by large constant size weighted interrogation windows. Here it has been modelled as 14 iterations of a weighted moving average. It should be noted that the considerations made here are the result of approximating the response of a non linear process like the particle image velocimetry to the one of a linear operator like the moving average. Nevertheless they can give a qualitative idea of what are the factors that may concur to the final result of the operations performed by the different algorithms used in this PhD Thesis.

The use of a weighting window in the evaluation of the cross correlation coefficient and in the iterative process of the image deformation can be used to both stabilize the PIV process and to solve length scales smaller than the interrogation window linear dimension (Nogueira et al. 1999, 2001a, 2002; Lecuona et al. 2002). In this processing the size of the interrogation window does not need to be changed. Variations on the grid distance do not affect the frequency response related to the Stereo-LFC PIV. It just displaces the Nyquist limit defining the aliasing in the result. Consequently, the frequency response related to the Stereo-LFC PIV does not vary in the figures of this section. It correspond to a window size  $Ws = 64$  pixels with the weighting function described in expression 6.2.1.

On the other hand, the Multigrid approach used in the comparisons, uses different window sizes and smoothing between iterations to avoid the instabilities. Thus, the frequency response related to the

Multigrid varies with this size of the interrogation window. Besides, different ways of smoothing may be used. In this work it consists in a 3 by 3 grid nodes moving-average of the vector field for all the iterations except the last one. This smoothing is connected to a corresponding frequency response depending on the area covered by the 3 by 3 vectors. Consequently, in this case, the variation of the grid distance does not only change the location of the Nyquist limit, but also varies the frequency response of the whole system.

To better understand the frequency response implications of the different algorithms some considerations follow. When a first hint of the flow is given, it can be divided in two parts:  $A_0$  which corresponds to the exact flow field to be measured and  $\varepsilon$  which corresponds to the errors included in this hint of the flow field. This means that the hint is:  $A_0 - \varepsilon$ . After using this information for the deformation of the PIV images, the remaining difference between the images to measure is  $\varepsilon$ .

Extending the reasoning of Astarita (2007) to this situation and defining “ $a$ ” as the frequency response of the PIV, the measurement of these images would yield  $a \cdot \varepsilon$ . This is the value that the algorithm uses for the correction of the initial flow field hint and results in the following vector field:  $A_0 - \varepsilon + a \cdot \varepsilon$ .

The next step for the Stereo-Multigrid approach used in this Thesis is a smoothing of the vector field. Defining “ $b$ ” as the frequency response of this smoothing, the new value for the measurement is  $b \cdot (A_0 - \varepsilon + a \cdot \varepsilon)$ .

That is the value after a PIV measurement and smoothing that would feed the following iteration. In particular, if this information is used again for the deformation of the PIV images, the remaining difference between the images is  $A_0 - b \cdot (A_0 - \varepsilon + a \cdot \varepsilon)$ . The measurement of such difference between the images would yield:  $a \cdot [A_0 - b \cdot (A_0 - \varepsilon + a \cdot \varepsilon)]$ .

Adding this value to  $b \cdot (A_0 - \varepsilon + a \cdot \varepsilon)$ , that is the actual hint of the velocity, gives a final vector field defined by:  $a \cdot [A_0 - b \cdot (A_0 - \varepsilon + a \cdot \varepsilon)] + b \cdot (A_0 - \varepsilon + a \cdot \varepsilon)$ , that once rearranged is presented in expression 6.4.1.

$$A_0 \cdot (b + a - a \cdot b) - \varepsilon (b - 2 \cdot a \cdot b + a^2 \cdot b) \quad 6.4.1$$

This result is particularly interesting because it corresponds to the last two iterations of the Stereo-Multigrid used in this Thesis. In this algorithm, the last iteration is not smoothed and the window size and grid distance is not changed between the last two iterations. This is a common practice when applying such algorithms.

For the Stereo-LFC PIV  $b = 1$  as there is no smoothing between iterations. It has to be taken into account also that the size of the interrogation window is not changed for a large number of iterations. This way the equivalent equation to 6.4.1 after  $n$  iterations becomes:

$$A_0 - \varepsilon (1 - a)^n \quad 6.4.2$$

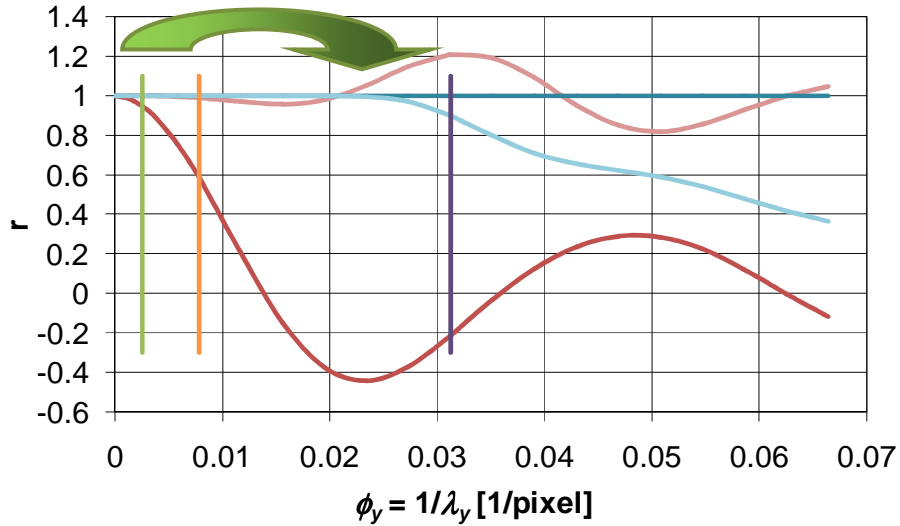
The factor multiplying  $A_0$  in expression 6.4.1 represents the worsening of the flow field as a result of the smoothing of the PIV measurement while the factor multiplying  $\varepsilon$  in both expressions, 6.4.1 and 6.4.2, represents the ability of the algorithm in reducing the error. In all the graphics associated to this last factor along the rest of the Thesis, its complementary value is plotted (i.e. expression 6.4.3 for the Multigrid approach and expression 6.4.4 for the LFC approach). These can be defined as the ability to measure the error in order to correct it.

$$1 - (b - 2 \cdot a \cdot b + a^2 \cdot b) \quad 6.4.3$$

$$1 - (1 - a)^n \quad 6.4.4$$

The relevance of splitting the initial hint into  $A_0$  and  $\varepsilon$  is related to the frequency content of each part. As commented in Section 6.2, while  $A_0$  may have predominance of certain spatial wavelengths,  $\varepsilon$  may have components of almost any spatial wavelength. Even when analyzing large scales, small scale errors may appear, for example because of the presence of outliers.

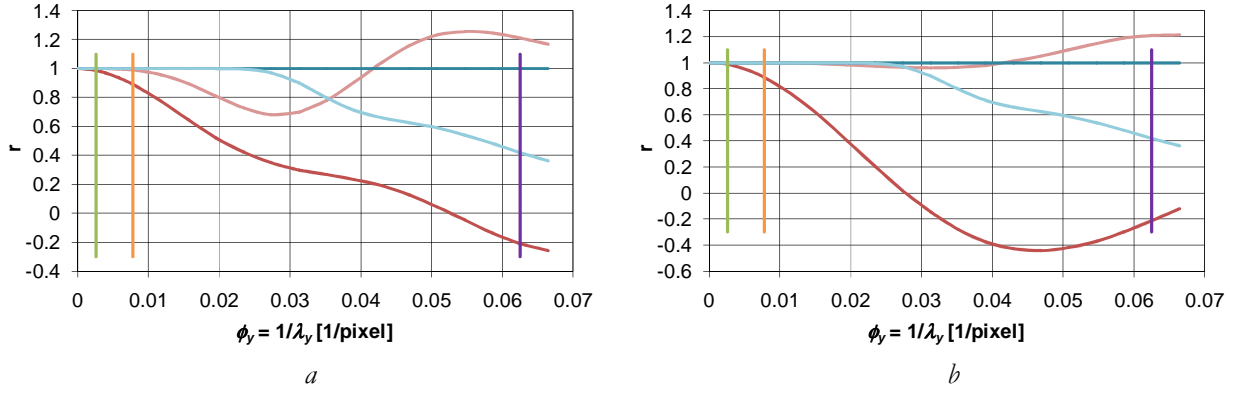
The consequences can be further commented using figure 6.4.2. It can be noticed that the difference between the response of the two advanced algorithm (dark blue line for the Stereo-LFC and red line for the Stereo-Multigrid) in the zone corresponding to large scale features (green vertical line) is small.  $A_0$  may be restricted to this zone and a good measurement would be obtained if other errors do not arise, independently to the algorithm used. However, if previous iterations generated spurious errors the result may be quite different for each algorithm. For example, in a situation in which outliers might appear, the residual error even after locating and correcting them through validation and interpolation may include small spatial wavelengths. This would lead to a zone (indicated by a green arrow) where the Stereo-Multigrid PIV underestimates or overestimates the errors (pink line, corresponding to expression 6.4.3). Stereo-LFC PIV, in contrast, shows a better ability to deal with the error (pale blue line, corresponding to expression 6.4.4) down to the Nyquist limit (vertical purple line).



**Figure 6.4.2:** Frequency response and ability to measure the error for: Stereo LFC-PIV (blue-line for the response to the original flow field, light blue for the response to spuriously introduced error,  $W_s = 64$  pixels), Stereo Multigrid enhanced with image distortion ( $W_s = 32$  pixels and  $\sigma = 50\%$ , red line for the response to the original flow field and pink for the response to spuriously introduced error). The green vertical line represent large vortices with  $R_0 = 83$  pixels, the orange one  $R_0 = 28$  pixels and the purple one is the Nyquist limit.

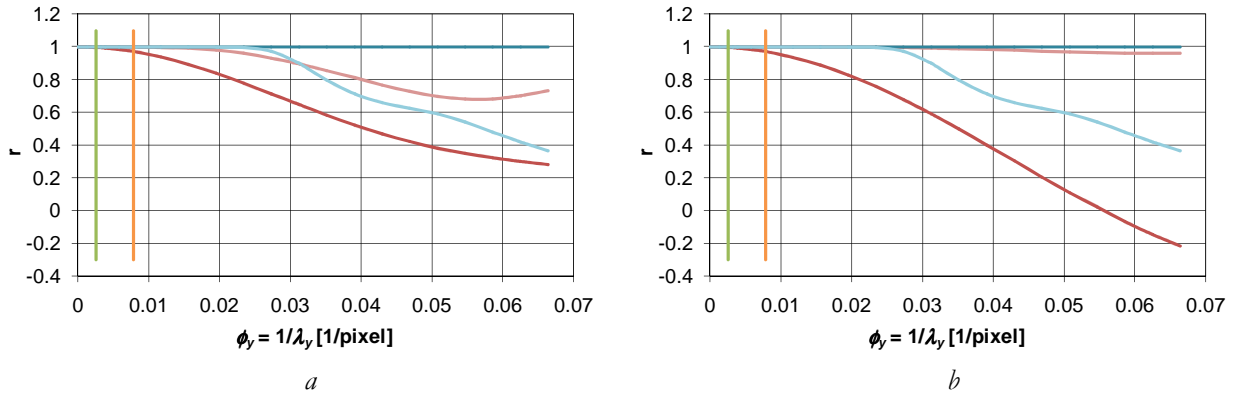
Other combinations of grid distances and interrogation window sizes have been used within this Thesis. Corresponding plots for frequency responses follow. In general reducing the sizes improves spatial frequency responses. The negative effect of these reductions on robustness is commented within the chapters 7 and 8. The two leftmost vertical lines correspond to the characteristic scales of the flow fields analyzed in chapter 7.

Figure 6.4.3 corresponds to measurements with a grid distance of 8 pixels. Comparisons of left and right plots indicate that for the characteristic flow scales just commented, no difference can be noticed. Still, when outliers appear, the advantages of the window  $W_s = 16$  pixels and 50% of overlapping in the zone with  $\phi_y < 0.04$  pixels are clear in terms of ability to treat the error. Nevertheless the smaller dimension of the interrogation window might result in smaller robustness of the algorithm due to the lower number of particles present when performing the measurement with a consequent decrease in the signal to noise ratio.



**Figure 6.4.3:** Frequency response of a moving average for a grid distance of 8 pixels: same symbols as in figure 6.4.2. For the Stereo Multigrid enhanced with image distortion: **a)**  $W_s = 32$  pixels and  $ov = 75\%$  **b)**  $W_s = 16$  pixels and  $ov = 50\%$

The same reasoning can be done for the cases of 4 pixels grid distance depicted in figure 6.4.4; in this last case the robustness difficulties due to the window dimension are significant, especially in real images. Section 8.3.1 of chapter 8 illustrates this issue



**Figure 6.4.4:** Frequency response of a moving average for a grid distance of 4 pixels: same symbols as in figure 6.4.2. For the Stereo Multigrid enhanced with image distortion: **a)**  $W_s = 16$  pixels and  $ov = 75\%$  **b)**  $W_s = 8$  pixels and  $ov = 50\%$

## 7. TESTS ON SYNTHETIC STEREO-PIV IMAGES

This chapter evaluates the performance of the Stereo-LFC PIV combination on synthetic images corresponding to known flow-fields, described below. To better evaluate the advantages of the combination of PIV advancements here proposed, two alternative techniques have been tested as reference. Consequently, three are the algorithms to consider:

- i. Conventional-Stereo PIV. It consists of a single pass processing and constitutes the basic reference. This algorithm generates the largest errors. For this reason, the incidence of outliers has been reduced by restricting the search of the correlation peak to the range of velocities present in each evaluation.
- ii. Multigrid-Stereo PIV enhanced with image distortion. It has been implemented using commercial software. In this case, smoothing is needed to avoid the growth of the unstable wavelengths (Nogueira et al. 2002, Scarano 2004, among others). In general, different ways of smoothing may be used. In this work, it consists in a 3 by 3 grid nodes moving-average of the vector field for all the iterations except the last one. The initial window size for this algorithm has been set to 64 pixels in order to test its robustness in a common base with the other two algorithms. Nevertheless, it should be pointed that the results obtained with different initial window sizes (128 and 32 pixels have been tested) were worst than the ones presented in this Chapter. The number of measurements for each window was selected to be two as more measurements per window were not improving the results.
- iii. Stereo LFC-PIV. Apart from image distortion, this iterative algorithm adds the benefits of a particular weighting function (Nogueira et al. 2001a). As a result, it does neither need smoothing of the velocity field in the iterative process nor a reduction of the interrogation window size to achieve high resolution.

Exceptionally, section 7.3 does not consider the first of the three algorithms. This is due to the difficulty of the measurement that results in large errors, out of the acceptable range, for that conventional processing.

### 7.1. Synthetic image generation

The final objective of this study is the application of Stereo-LFC PIV to real images, both at laboratory and at industrial scales. A previous step consists on testing the performances of the above mentioned Stereo PIV algorithms on synthetic images, where the different parameters defining the image can be accurately controlled and used to discriminate different sources of error.

The following sections (7.1.1 and 7.1.2) are dedicated to the description of the flow under study and the methodology used to generate the synthetic images corresponding to that flow field with a certain stereo configuration.

#### 7.1.1. Flow field description and error assessment

The in-plane test displacement field implemented in these images corresponds to one isolated modified Rankine vortex. The velocity flow field follows the expression:

$$v_{\theta} = \frac{2U_0 (r/R_0)}{1 + (r/R_0)^2}; \quad v_r = 0 \quad 7.1.1$$

Where  $U_0$  is the maximum tangential velocity, located at the vortex radius  $r = R_0$ . The parameters selected to define the vortex in the different tests are  $R_0$  and the peak vorticity,  $\omega_p$ , corresponding to:

$$\omega_p = 4U_0/R_0 \quad 7.1.2$$

The local vorticity diminishes to quickly reach  $\omega_p/4$  at a distance  $R_0$  of the centre of the vortex. Vortices are common features in flow fields. In addition, variation of the vorticity allows for the evaluation of the performance of the PIV algorithms for different values of the in-plane velocity gradients. The selection of the vortex radius allows a separate study of performance for large and small scales features. These are presented in sections 7.2 and 7.3 respectively. The discussion offered in Section 6.3 for stereo PIV setups indicates that the flow field selected for these synthetic images has additional advantages for the exploration of the spatial resolution capabilities of a stereo PIV algorithm. That discussion indicates that a flow configuration with the vortex axis perpendicular to the laser sheet allows the measurement of small scales that would not be solvable with other orientations, because of the superposition of information in the line of view.

The knowledge of the exact flow-field used to generate the image and the repeatability of the analysis by different researchers are two of the main advantages of synthetic images. In addition, this kind of images allows to separately evaluating errors coming from different difficulties in the flow field. In particular, this study focuses on the effect of the following aspects that can increase the error:

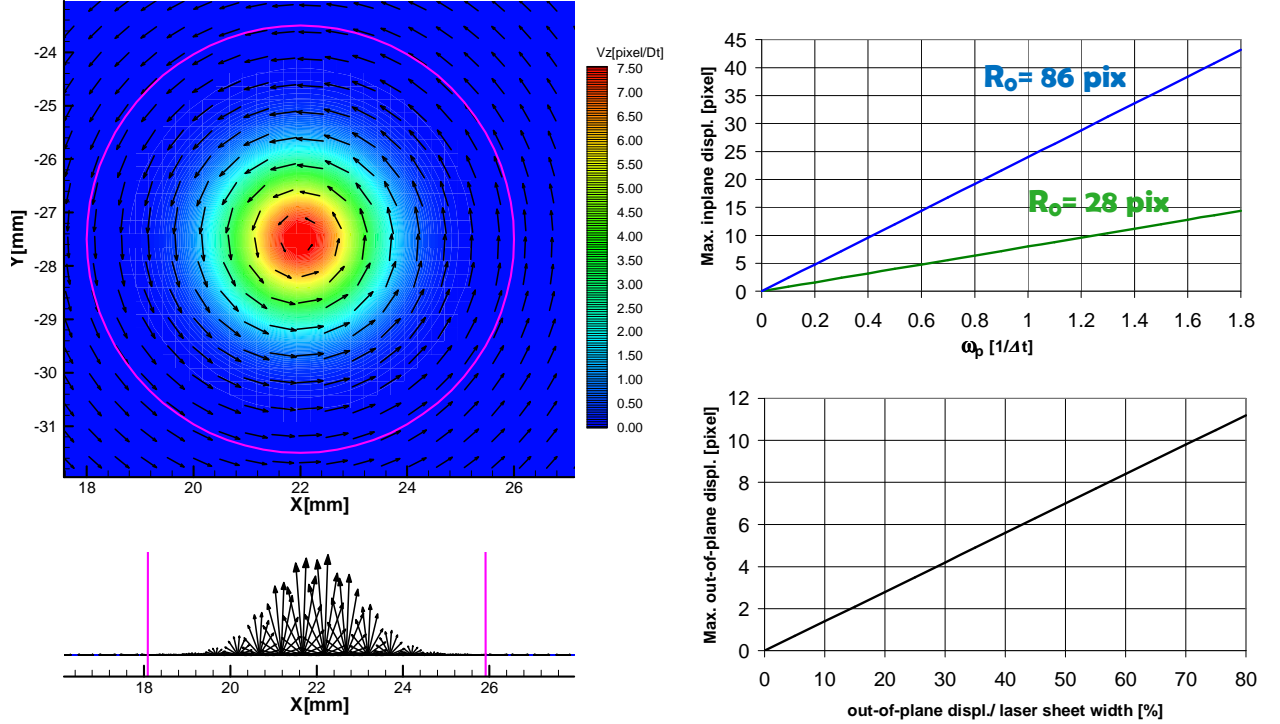
- i. The variability of the performance caused by the different locations of the particles due to the random nature of the particle pattern in a set of images. This error is ascertained by evaluating 10 different random particle locations for each test condition. Smaller variability can be interpreted as a quality in favour of robustness of the algorithm.
- ii. The loss of particle pairs due to the motion of the particles perpendicular to the laser sheet. This has been considered in two different scenarios. One is a uniform out-of-plane velocity added to the test field under study. The other is a Gaussian profile for the out-of-plane velocity, thus including gradient in the out-of-plane component (figure 7.1.1).

The Gaussian profile for the third component of velocity is axisymmetric with respect to the centre of the vortex with the  $e^{-2}$  attenuation position located at the vortex radius. This is described by expression 7.1.3, where  $OOP$  corresponds to the maximum out-of-plane displacement. The aim is to mimic some vortex filament dynamics and offer a comparison to uniform motion.

$$v_z = OOP \cdot e^{-\frac{2 \cdot r^2}{R_0^2}} \quad 7.1.3$$

- iii. Gradients coming from the combined effect of peak vorticity and size of the vortices in the flow field under study.

The images correspond to oblique views in the stereo realizations, thus the magnification is not constant along them. Despite this, an approximation of the correspondence between physical magnitudes and displacements in pixels is given in figure 7.1.1. This approximation corresponds to the magnification in the centre of the image. The case of large scales ( $R_0 = 6 \text{ mm} \sim 86 \text{ pixels}$ ) and that of small scales ( $R_0 = 2 \text{ mm} \sim 28 \text{ pixels}$ ) are discriminated.



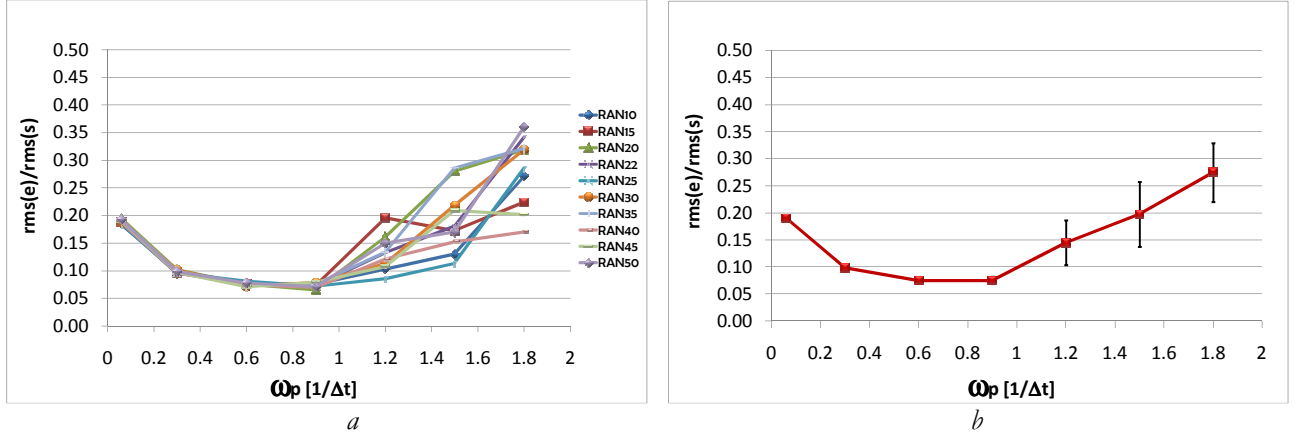
**Figure 7.1.1:** Example of a synthetic vortex vector field with a Gaussian out-of-plane displacement (left hand side). The magenta circle corresponds to a 2 diameter area which is the vector field surface used for the calculation of errors in this chapter. Correspondence between physical units and pixels (right hand side)

For each realization, a normalized error is calculated in the area where  $r/R_0 < 2$  (see figure 7.1.1) as the root mean square of the error of the individual vectors, divided by the root mean square of the values of these vectors  $[\text{rms}(e)/\text{rms}(s)]$  for the in-plane components and  $[\text{rms}(e3C)/\text{rms}(s3C)]$  for the three components of velocity.

For the error analysis conducted in this chapter, two parameters have been characterized: the average error and the dispersion of the error. This can be done thanks to the 10 different realizations that have been generated for each measurement condition randomly varying the particle pattern for each flow field under study as commented in the point  $i$  of this section. This allows studying the sensibility of the algorithms performance to different particle locations (i.e. its robustness).

The average error consists in the mean value of these normalized errors for the 10 different realizations, and the dispersion error consists in the corresponding standard deviation. The first one is depicted with symbols in the error plots while the second is indicated as a dispersion bar. For a generic measurement, figure 7.1.2 depicts the correspondence between 10 different measurements for the 10 different random particle patterns evaluated for each test condition and the representation by means of the relative average value and dispersion bar.



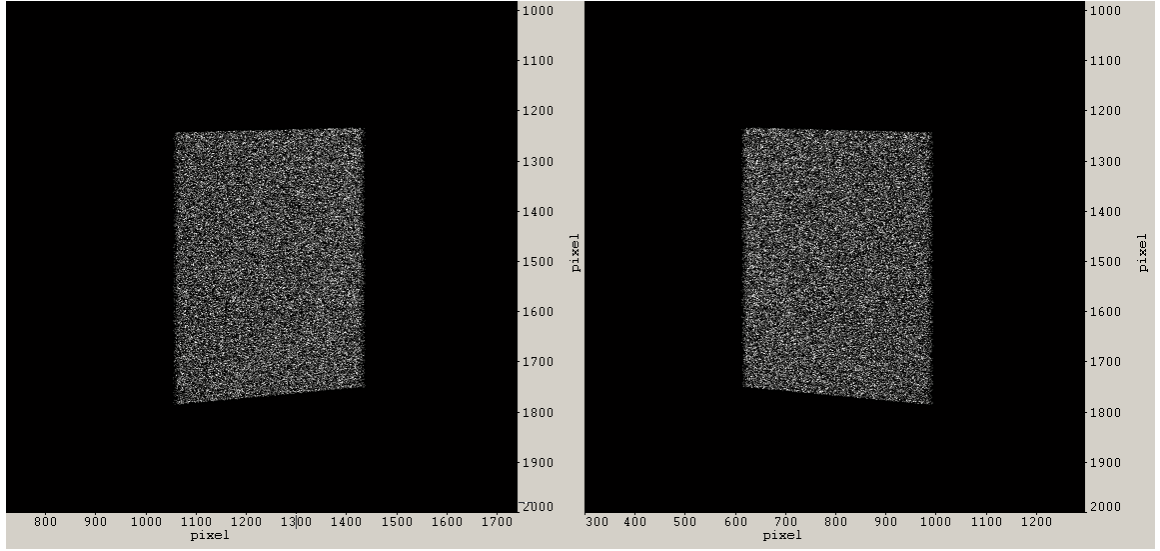


**Figure 7.1.2:** Example of a normalized error depiction for a generic measurement. **a)** Normalized error for 10 different measurements corresponding to the 10 different random particle patterns evaluated for each test condition. **b)** Representation by means of the relative average value and dispersion bar.

### 7.1.2. Image generation description

The synthetic image generator, which has been used by Lecuona et al. 2004, Nogueira et al. 2005 for conventional 2D-2C evaluations, has been improved to yield images corresponding to a desired stereo configuration. In particular the following computer programs had to be developed within this PhD Thesis:

- A synthetic 3D-calibration target generator was created, resembling the one used in real experiments. Based on a pinhole method, the corresponding images for the two camera views were generated and used for the calibration process.
- Also using the pinhole method, the images corresponding to the two camera views were generated. An example of the two views is depicted in figure 7.1.3. Related to those images it should be noted that:
  - ✓ The third component was included in the flow field. It either corresponded to the Gaussian profile in equation 7.1.3 or to a uniform translation ( $v_z = const.$ ) depending on the case.
  - ✓ The controlling parameters, OOP and  $\omega_p$ , allowed changing both the out-of-plane particle loss and the in-plane vorticity.
- The format of the resulting raw images had to be changed according to the one required for the different algorithms used in the comparisons.



**Figure 7.1.3:** Example of a synthetic stereo image: The cameras are in a forward-forward scattering Willert configuration (Willert, 1997). The angle between the laser sheet and the cameras is  $45^\circ$ .

The stereo configuration chosen for these images is used in Sections 7.2 and 7.3 and resembles the one of the real setup used in Chapter 8.

The cameras are in a forward-forward scattering Willert configuration (Willert, 1997). The angle between the laser sheet and the cameras is 45 degrees and the magnification at the centre of the image is  $70 \mu\text{m} / \text{pixel}$ .

As the purpose of these synthetic images is to test the ability to cope with difficulties arising from the particle displacement between pulses, they contain no noise except for the spatial discretisation of the simulated image sensor and the usual effective 8-bit gray level sampling.

The average distance between the randomly located particle images is small,  $\delta = 2$  pixels, i.e.  $4/(\pi\delta^2) \approx 0.3$  ppp (particles per pixel) at the centre of the image and varies accordingly to the 3D perspective.

The  $e^{-2}$  diameter of all the Gaussian particle images is  $d = 2$  pixels. This diameter is considered as a diffraction characteristic feature of the lenses and thus does not vary with the perspective. No optical vignetting is considered. The Gaussian shape of the particle images is integrated with unity fill factor over each square pixel surface (Westerweel 1998).

A top-hat constant intensity profile was selected for the light sheet, so that each particle can equally contribute to the correlation, reaching a maximum intensity at the centre of the particle of 39% of the gray level dynamic range. The width of the laser sheet corresponded to  $1 \text{ mm} \sim 14$  pixels. Where particles overlap, the corresponding intensities were added. The grey level saturation was absent in most of the image. The associated particle surface density is on the edge where speckle pattern may start to appear, but this phenomenon will not be taken into account in this Thesis.

The underlying principle behind the high-density chosen is to reduce the error due to sampling of the flow field and consequently more clearly reveal the effect of the parameters under study. On the other hand, the resulting images look very similar to real ones obtained in large wind tunnel careful experimentation, being the particle surface density similar.

## 7.2. Large scales

The response of conventional PIV to vortices of different sizes and its comparison with LFC-PIV performance can be found in Lecuona *et al.* (2004). In that reference, an extensive study is reported on the effect of group locking. This effect explains the reason why the error of conventional PIV at obtaining the peak vorticity does not vanish as the scale of the vortex to evaluate grows. Moreover,

this effect is also present when the peak vorticity is reduced to  $\omega_p < 0.06 \Delta t^{-1}$  as prescribed by Keane and Adrian (1993). In this scenario (Lecuona *et al.* 2004), 2D2C LFC-PIV performed with no group locking and was able to describe peak vorticities up to  $\omega_p < 1.2 \Delta t^{-1}$ , clearly higher than those of conventional PIV. Similarly to LFC-PIV, an iterative multigrid algorithm enhanced with image distortion is less sensitive to group locking. The inclusion of such algorithm in the comparisons of this section allows for a more exhaustive picture of the accuracy of different variants of PIV when evaluating large scale features, besides the fact that this case corresponds to evaluations in a stereo configuration.

Even though the spatial resolution capabilities of LFC are its main advantage, this section focuses in establishing if there are advantages left for LFC-PIV in situations where only large scale features are of interest, thus making it difficult for this technique to show its attractiveness.

The remaining benefits still to be analyzed are the robustness and the ability to cope with large displacement gradients. For both aspects, the performances of 2D3C-LFC-PIV are explored. These performances are characterized and compared with conventional and other advanced algorithms, when applied to synthetic PIV images.

It should be noticed that, even though the characteristic scale of the vortices analysed in this section is large, the process within iterative algorithms entails the introduction of small scale errors, for example because of the presence of outliers or errors introduced in the correction of outliers by validation and interpolation algorithms between iterative steps.

Section 6.4.2 in the previous chapter highlighted that the two different algorithms used in this Thesis deal with these errors in two different ways:

- The Multigrid Stereo PIV enhanced with image distortion tries to correct small scale errors mainly by smoothing.
- The Stereo-LFC PIV, thanks to the usage of its particular weighting function, tries to correct errors mainly by measuring them in the iterative processing.

This is a central issue in the study of the error presented in the following subsections.

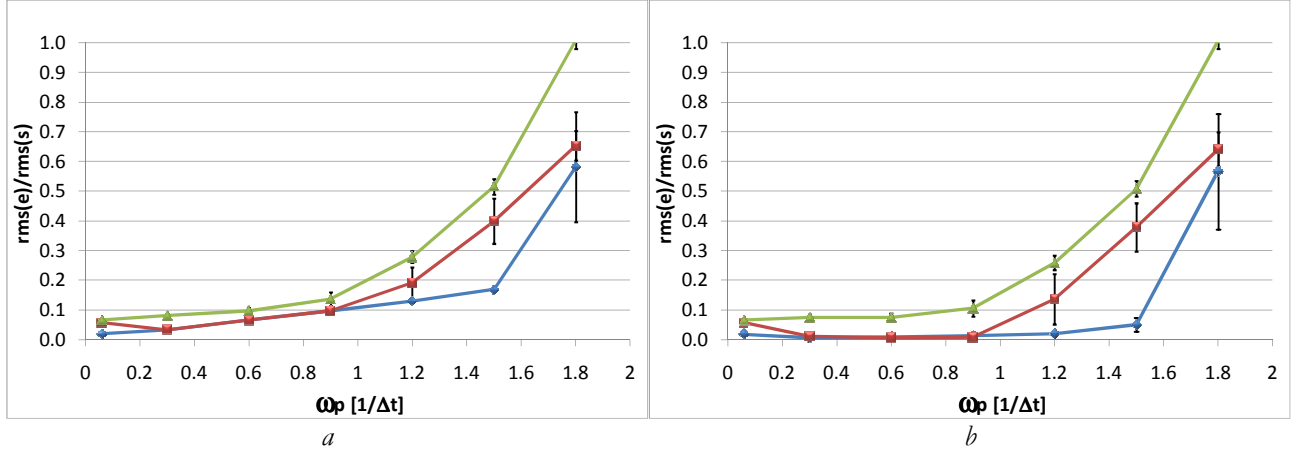
As commented before the analysis has been performed discriminating between the total error and the error only due to the type of algorithm used. For the tests, several sets of synthetic images of large scale vortices have been generated for different vorticities and out-of-plane velocities.  $R_0$  has been fixed to 6 mm, which roughly corresponds in the images to  $\sim 83$  pixels.

### 7.2.1. Vorticity tests

In this subsection the algorithms being compared are applied over large vortices in a Stereo configuration (2D3C). This allows checking the benefits of the ability to cope with large displacements gradients in two aspects:

- A reduced uncertainty of Stereo LFC-PIV measurements due to its low susceptibility to group-locking and to the different way of dealing with small scale errors.
- The capability of Stereo LFC-PIV to deal with larger displacement gradients than a conventional correlation Stereo PIV, thus allowing for the selection of larger  $\Delta t$  in the experiments where it is used.

The results for a conventional Stereo PIV, Stereo Multigrid PIV enhanced with image distortion and Stereo LFC-PIV are presented in figure 7.2.1a and b. They correspond respectively to the total error and the algorithm error.



**Figure 7.2.1:** Comparison of the normalized errors for Stereo setups of conventional Stereo PIV (triangles), Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion (squares) and Stereo-LFC PIV (diamonds) on a vortex flow for different peak vorticity values. **a)** Total error. **b)** Algorithm error.

The discrimination between the error due to the chosen type of algorithm and the total error, which also contains the one due to the integration time, allows focusing on the ability of the algorithm alone to face a certain displacement gradient, without directly linking the analysis to the time between laser pulses and the particular flow field.

Taking into account that for the implementation of the conventional Stereo PIV algorithm the search of the correlation peak has been restricted to the range of velocities present in each evaluation, measurements with normalized error below 20% can be obtained for  $\omega_p < 0.9 \Delta t^{-1}$ . For larger vorticities, image distortion algorithms are needed. Once image distortion is used, the lack of smoothing between iterations of Stereo LFC-PIV allows it to show improvement only for  $\omega_p < 0.2 \Delta t^{-1}$ . and  $\omega_p > 1 \Delta t^{-1}$ . Moreover, the smoothing used by the Multigrid scheme improves the results in a small percentage for the interval  $0.2 \Delta t^{-1} < \omega_p < 1 \Delta t^{-1}$ . This better result for a smoothing algorithm that discards the small details is consistent with the fact that this evaluation has been done in absence of small scale features.

Another relevant aspect is related to the larger dispersion for the Stereo-Multigrid enhanced with image distortion in a zone with error smaller than 20%.

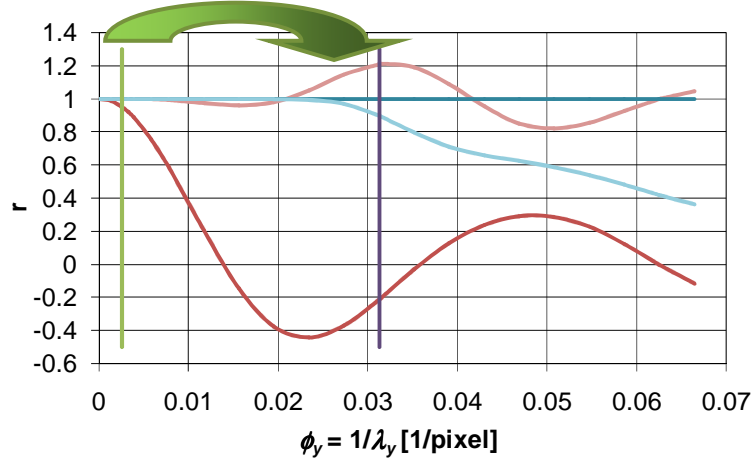
One possible explanation of this fact, which appears neither for the Stereo Conventional PIV nor in the Stereo-LFC PIV, is associated with the frequency response of the algorithm as commented in section 6.4.2.

Although the response of the Stereo Multigrid PIV in the last two steps is inadequate for small wavelengths, the large scales features analysed in this section show a negligible difference between the Stereo-Multigrid and the Stereo-LFC PIV (seen figure 7.2.2).

Nevertheless, as remarked in section 6.4.2, with an image distortion algorithm the outliers that appear in intermediate steps of the algorithm introduce random errors of both low and high frequency. In the first case these errors are easily corrected for the Multigrid approach but in the second case the error can be overcorrected by up to a 20% of its value (pink line in figure 7.2.2).

The hypothesis just presented is supported by the fact that differences in performance increase at peak vorticities large enough to be connected with outliers' incidence. For peak vorticities larger than  $\sim 0.9 \Delta t^{-1}$ , no correlation algorithm can produce good results in the first step at the vortex core. The outliers that appear in intermediate iterations, even after being detected by a validation algorithm and substituted by interpolation, generate errors along the entire spatial frequency domain. This is indicated in figure 7.2.2 by an arrow starting at the main spatial frequency of the vortex and pointing to smaller ones. After the gradient reduction due to the image deformation, the measurement is less complex in the successive iterations. Nevertheless, this involves the commented evaluation of large scales, from the flow, together with small scales, from the errors.

Also the large dispersion bars for these large vorticity cases support the hypothesis. This large dispersion can be related to the random nature of the errors appearing in previous iterations, which results in a large variability of the results.



**Figure 7.2.2:** Frequency response and ability to measure the error for: Stereo LFC-PIV (blue-line for the response to the original flow field, light blue for the response to spuriously introduced error,  $W_s = 64$  pixels), Stereo Multigrid enhanced with image distortion ( $W_s = 32$  pixels and  $\sigma = 50\%$ , red line for the response to the original flow field and pink for the response to spuriously introduced error). The green vertical line represents large vortices with  $R_0 = 83$  pixels and the purple one is the Nyquist limit.

A better correction for these errors allows the Stereo LFC-PIV to show an acceptable performance up to peak vorticities of  $1.5 \Delta t^{-1}$ . In consequence, for these cases and processing, the error measurement and correction without smoothing of the Stereo-LFC seems a better procedure than the smoothing of the error needed in Multigrid approach for convergence of the measurement.

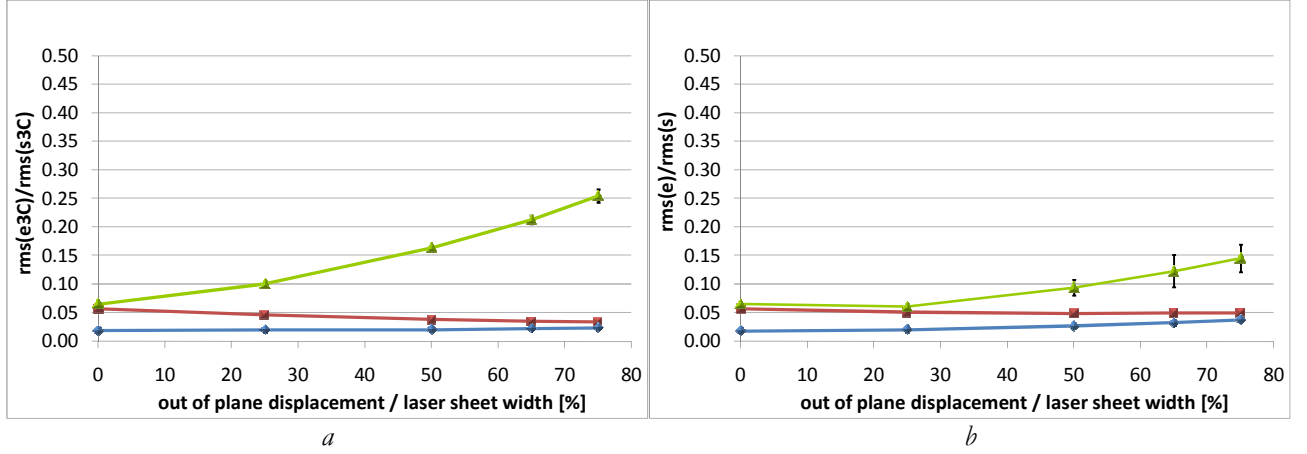
When focusing on the last point, corresponding to the peak vorticity  $\omega_p > 1.8 \Delta t^{-1}$ , a very high total error can be observed for both algorithms, indicating a questionable measurement. Only Stereo-LFC PIV reflects this aspect with a consistent significant dispersion. Under these conditions, this can be considered as an indication that its limit is being reached. The lower dispersion of the Multigrid Stereo PIV, enhanced with image distortion, seems to be due to the smoothing between iterations.

Finally it can be pointed that the possibility of measuring peak vorticities up to  $1.5 \Delta t^{-1}$  (which corresponds to a rotation of  $\sim 43^\circ$ ), increases the dynamic range for vorticity measurements with an error smaller than 10% increases of about 60% for the Stereo-LFC PIV. This allows also a larger time between light pulses increasing the dynamic range for velocity measurements.

### 7.2.2. Out-of-plane displacement tests

As commented before, one of the problems when increasing the time between light pulses is the increment of out-of-plane loss of particle pairs. It is of interest to evaluate how much of this out-of-plane loss is tolerable by an advanced algorithm in a Stereo configuration.

The flow chosen for this analysis is linked to the relevant issue of evaluating the ability of the algorithms to discriminate vortices at several conditions. Some of these conditions include low vorticity with a large out-of-plane displacement. This appears when trying to measure secondary flows or unstable flow development. A typical case is the cross cut of a jet. Consequently, for this evaluation, sets of synthetic images that correspond to the vortex used in the previous section with  $\omega_p = 0.06 \Delta t^{-1}$ , with different out-of-plane velocities were generated.



**Figure 7.2.3:** Comparison of the normalized algorithm error for small vortices of  $\omega_p < 0.06 \Delta t^{-1}$  and different uniform out-of-plane displacements. Same code for symbols as in figure 7.2.1. **a)** Error including the three components of the velocity. **b)** Error relative to the two in-plane components of the velocity (rotation movement).

Again, these images were analyzed by the three methods being compared.

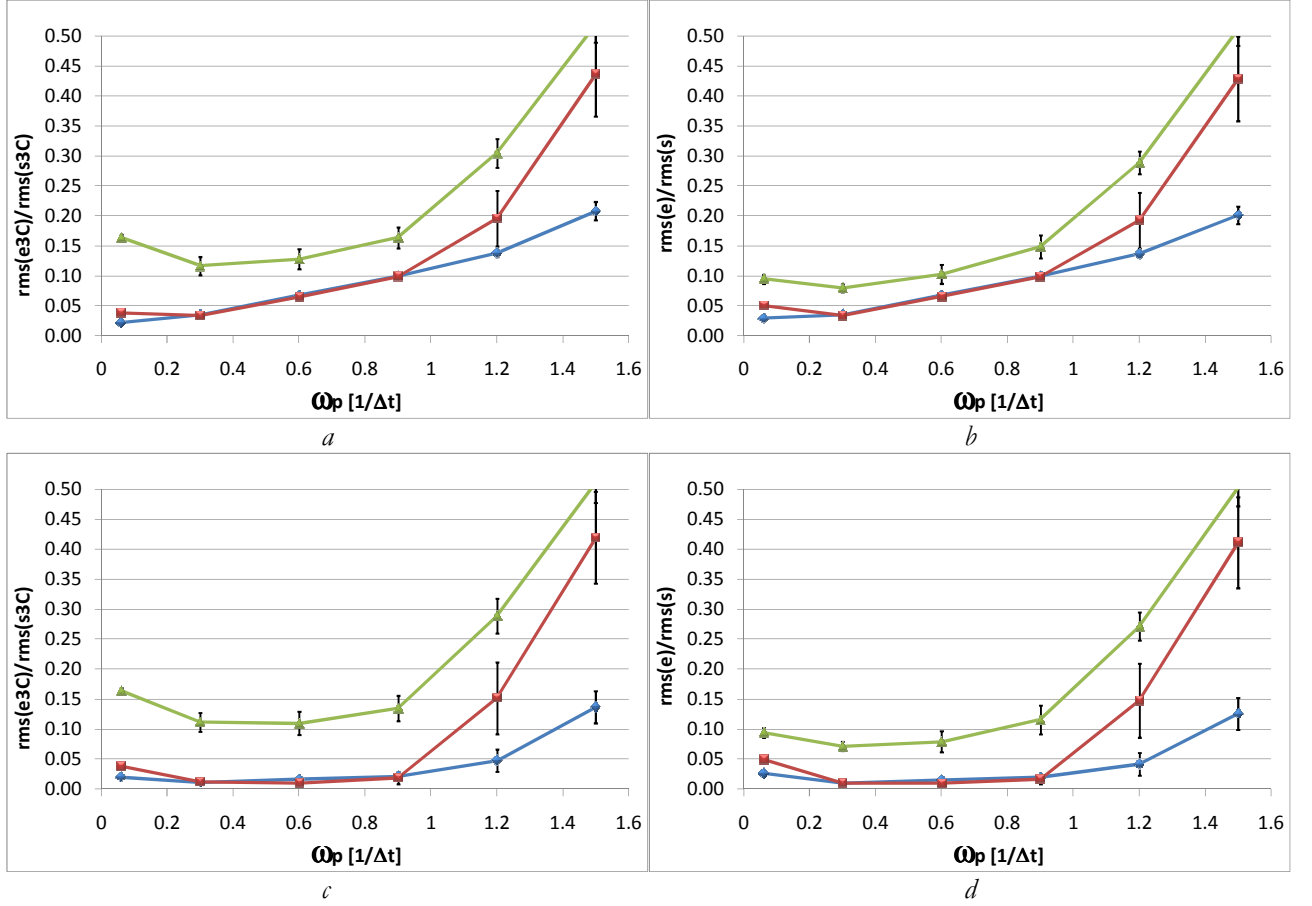
The normalized algorithm error for  $r/R_0 < 2$  has been calculated taking into account either the two in-plane components of the velocity or the three ones, even though the out-of-plane was just a uniform translation. The results are presented in figure 7.2.3. It can be noticed that there are not significant differences between the error relative to the three components of velocity and the one related to the in-plane components unless a Stereo Conventional PIV is used. This can be associated to the significantly larger displacement associated to the out of plane direction in comparison with the rotation

For the iterative algorithms, all realizations show small errors and small variations in respect to the case without out-of-plane velocity depicted for  $\omega_p = 0.06 \Delta t^{-1}$  in figure 7.2.1. The 3C error ranges between 1.9 % and 2.4% for the Stereo LFC-PIV and between 3.3% and 5.8% for the Stereo Multigrid with image distortion. In both cases, the standard deviation is smaller than 0.2%.

This indicates that, when small vorticities in large vortices are studied, even with only 25% of particles present in both the first and second image, both algorithms are able to correctly measure, the flow field.

### 7.2.3. Vorticity combined with out-of-plane displacement tests

The combination of different vorticities with a significant out-of-plane velocity completes the tests performed for large scales. The out-of-plane displacement due to this velocity field corresponds to 50% of the laser sheet width in the centre of the vortex. Figures 7.2.4 a and b represent the total 3C and 2C errors respectively and figures 7.2.4 c and d plot the 3C and 2C algorithm errors.



**Figure 7.2.4.** Comparison of the normalized total error (a and b) and algorithm error (c and d) for vortices of  $\omega_p < 0.06 \Delta t^{-1}$  and 50% uniform out-of-plane displacements. Same code for symbols as figure 7.2.1. **a-c)** Error including the three components of the velocity. **b-d)** Error for the two in-plane components of the velocity (rotation movement).

The information obtained makes evident that, even in the absence of small scales features, the use of the Stereo LFC-PIV combination offers an improved robustness when dealing with significant velocity gradients. It seems worthwhile to notice that when evaluating a certain case, for example  $\omega_p = 1.2 \Delta t^{-1}$ , the vorticity in most of the area evaluated ( $r/R_0 < 2$ ) is significantly smaller ( $\omega_p = 0.3 \Delta t^{-1}$  at  $r = R_0$ ).

The results are coherent with the one presented in absence of out of plane. Even in presence of a 50% of it, the error for the Stereo LFC-PIV is acceptable for peak vorticities up to  $\omega_p = 1.5 \Delta t^{-1}$ , enhancing the robustness of the algorithm with respect to the dynamic range.

The hypothesis made in subsection 7.2.1 remains as a possible explanation. The poor response of the Multigrid approach to errors introduced by incidence of outliers and its correction explain both the mean error increase and the enlarged error dispersion in respect to the Stereo LFC approach for peak vorticities above  $\omega_p = 0.9 \Delta t^{-1}$ .

### 7.3. Small scales

In this section, the study is focused on small scale structures but large enough to be resolvable by both advanced algorithms under comparison. In particular,  $R_0$  has been fixed as 2mm  $\sim 28$  pixels for all the cases. This means spatial wavelengths in the order of 112 pixels. Under these conditions, only the two advanced algorithms are compared, due to the poor performance of the Stereo-Conventional PIV.



For the first analysis presented in each subsection, the smallest interrogation window is  $W_s = 32$  pixels for the Stereo Multigrid processing. This window size has no negative frequency response down to wavelengths of 32 pixels which matches the Nyquist criterion for a grid node distance of 16 pixels. This is the grid distance used in such cases for both the Multigrid approach and the Stereo-LFC one.

Further investigation on the resolution is presented in each subsection reducing the grid distance for both algorithms to 8 pixels and 4 pixels. In the Stereo Multigrid PIV both the dimension of the interrogation window ( $W_s = 32, 16$  or 8 pixels) and the overlapping ( $ov = 50\%$  or  $75\%$ ) has been varied in order to check the sensibility of the algorithm to these parameters. One reason for the variation of the results with these changes is the different frequency response for each set as commented in section 6.4.2 of the previous chapter. Nevertheless, the variation of the robustness associated to the number of particles present in the interrogation window plays also a role that has to be taken into account.

Like in the previous section, the mean value and the standard deviation of the error are plotted for each case.

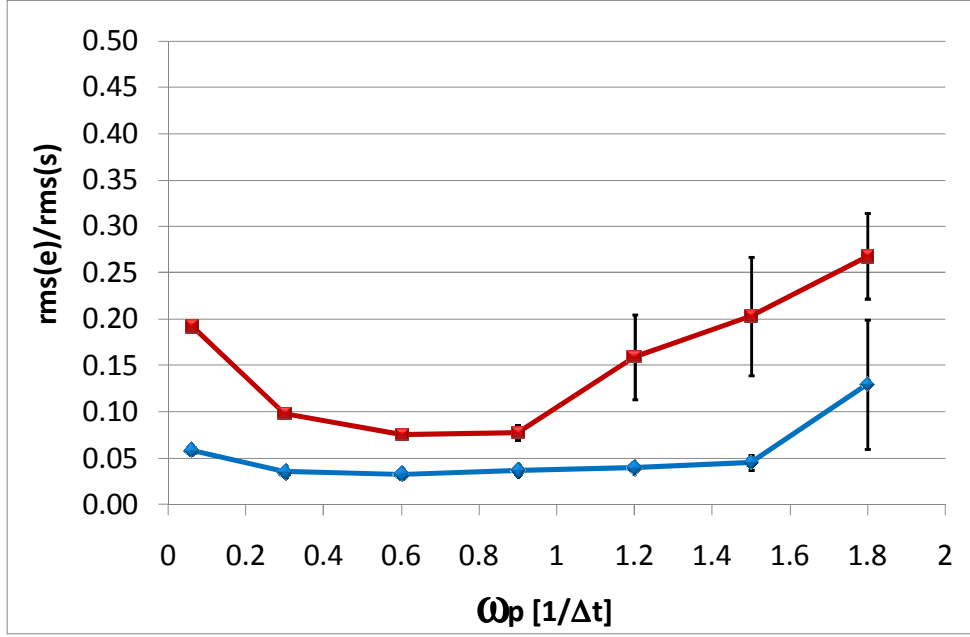
### 7.3.1. Vorticity tests

Figure 7.3.1 presents a first comparison between Multigrid Stereo PIV enhanced with image distortion and Stereo LFC-PIV for small scale vortices. This is the case corresponding to  $W_s = 32$  pixels for the last iteration of Stereo-Multigrid processing. The grid node distance is 16 pixels.

Due to some tests done on the functioning of the image generation programs to check for its correct performance, in this case 20 different random particle patterns for each test condition were available and have been evaluated. In respect to the cases in which this value is 10, this has no influence on the results obtained for the mean error and the error dispersion except for a slightly more accurate value for them from the larger sampling.

The results show that, when dealing with small structures at moderate resolution (1 vector each 16 pixels), the Stereo LFC-PIV performs better than the Multigrid Stereo PIV enhanced with image distortion, for all peak vorticities. The standard deviation is considerably smaller for the Stereo LFC-PIV, showing a higher robustness of this algorithm up to vorticities of  $\omega_p \sim 1.5 \Delta t^{-1}$  (which corresponds to a rotation of  $\sim 43^\circ$ ). Above this vorticity (for  $\omega_p \sim 1.8 \Delta t^{-1}$ ), although the measurement is better for the Stereo-LFC method, the error standard deviation is higher, showing the difficulty of such measurement. This resembles the case of large scales depicted in figure 7.2.1.





**Figure 7.3.1:** Comparison of the normalized algorithm error for small scale vorticity. Same code for symbols as in figure 7.2.1. In this case 20 different particle patterns are evaluated at each measurement point instead of the usual 10 of the rest of the cases in this Thesis.

For good experimental images,  $W_s < 32$  pixels can be used in the last iteration of Multigrid systems. Consequently, it is of interest to study the performance for smaller window sizes.

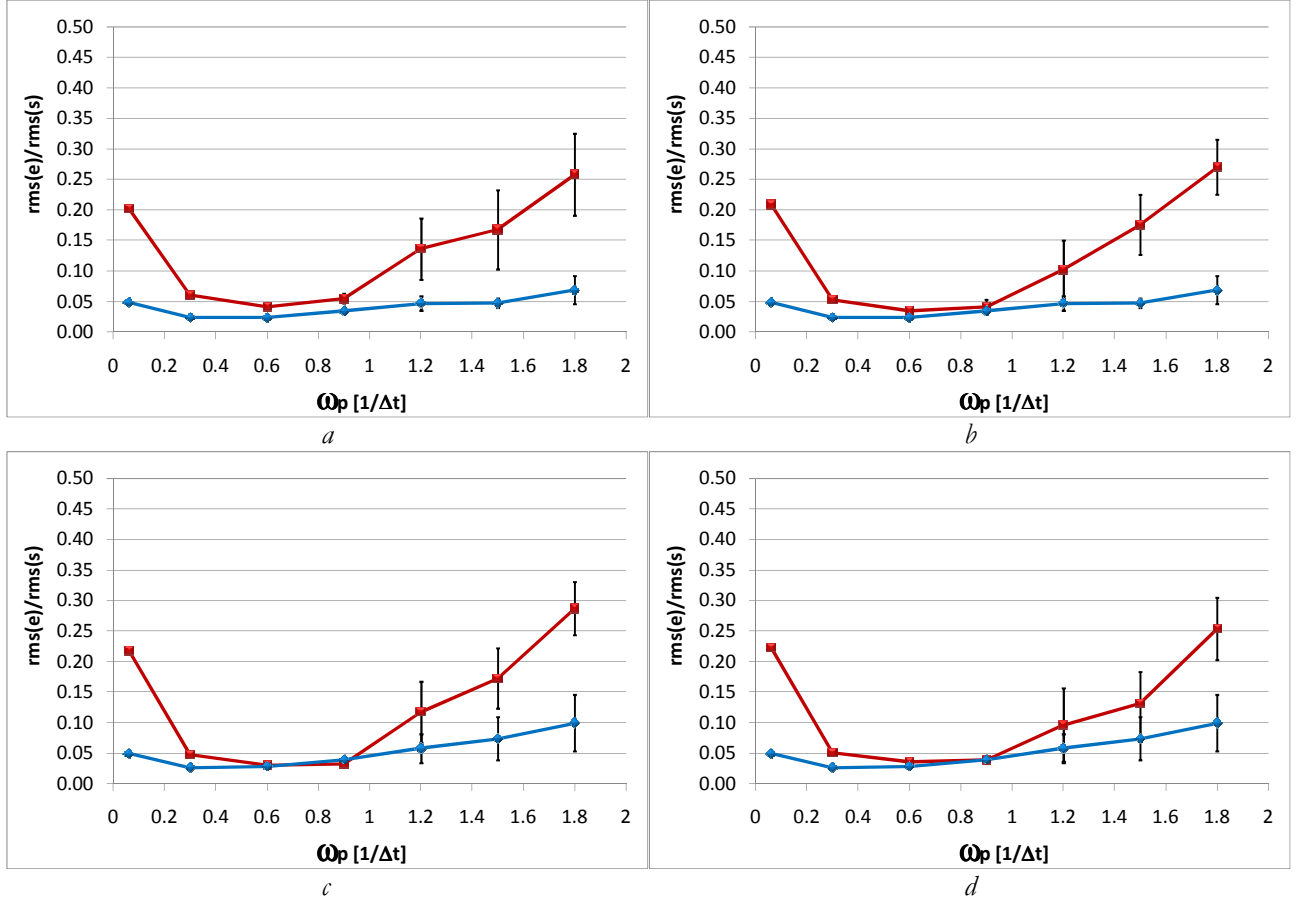
In order to do this, additional tests have been performed. The results are depicted in figure 7.3.2.

In the case of Stereo-LFC PIV the window size corresponding to the last iteration is  $W_s = 64$  pixels for all cases and the grid distance has been reduced by means of overlapping to match that of the Stereo-Multigrid (8 and 4 pixels between vectors respectively). The Stereo-Multigrid PIV has been tested in the following conditions for the last iteration:  $W_s = 32$  pixels with  $ov = 50\%$  and  $75\%$ ,  $W_s = 16$  pixels with  $ov = 50\%$  and  $75\%$ , and  $W_s = 8$  pixels with  $ov = 50\%$ .

As commented in chapter 6, two important considerations must be done when choosing  $W_s$  and the overlapping.

Regarding the Stereo-Multigrid PIV performance, reducing the dimension of the interrogation window together with the grid distance has the advantage of increasing the spatial resolution, according to the frequency response of the PIV interrogation and the 3 by 3 vectors smoothing in the intermediate iterations. The disadvantage is that the reduction on the dimension of the window implies a reduction on the number of particle images that it contains. This leads to a reduction in the signal to noise ratio, which leads to a lower robustness. Even for the synthetic images, that almost contain no noise, this disadvantage does not overcome the benefit for the cases shown in figure 7.3.2. Experience shows that in real images, the conditions are usually less favorable, being difficult to obtain good results with  $W_s = 8$  pixels. Chapter 8 further illustrates this point. Excessive reduction of the overlapping without a reduction of the interrogation window displaces the Nyquist limit to smaller spatial wavelengths. For this to be favorable, the frequency response of the system would have to be appropriate at those frequencies which is not the case for large interrogation windows without weighting functions like the one used in the LFC approach.

In respect to Stereo-LFC PIV it can be remarked that when going to the smallest distance between vectors, for some of the tests, the dispersion of the measurement grows together with the error. This can be explained by the fact that each vector is responsible of a smaller zone in the deformation algorithm. Beside the possibility of reaching a higher resolution, to some extent this implies an increase of the sensitivity to local noise.



**Figure 7.3.2:** Comparison of the normalized algorithm error for small scale vorticity. The overlapping and window size in the last iteration of the Multigrid approach is given between brackets. **a)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 32$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **b)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$ ), **c)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **d)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 8$  pixels,  $ov = 50\%$ ). Same code for symbols as in figure 7.2.1.

The overall picture shows that the Stereo LFC-PIV confirms its higher dynamic range and robustness already found for large scales and lower resolutions.

The difference in the closest performance location for both algorithms ( $\omega_p \sim 0.9 \Delta t^{-1}$ ) could be attributed to resolution issues. It gives a qualitative picture similar to the moving average approximations depicted in the figures of section 6.4.2.

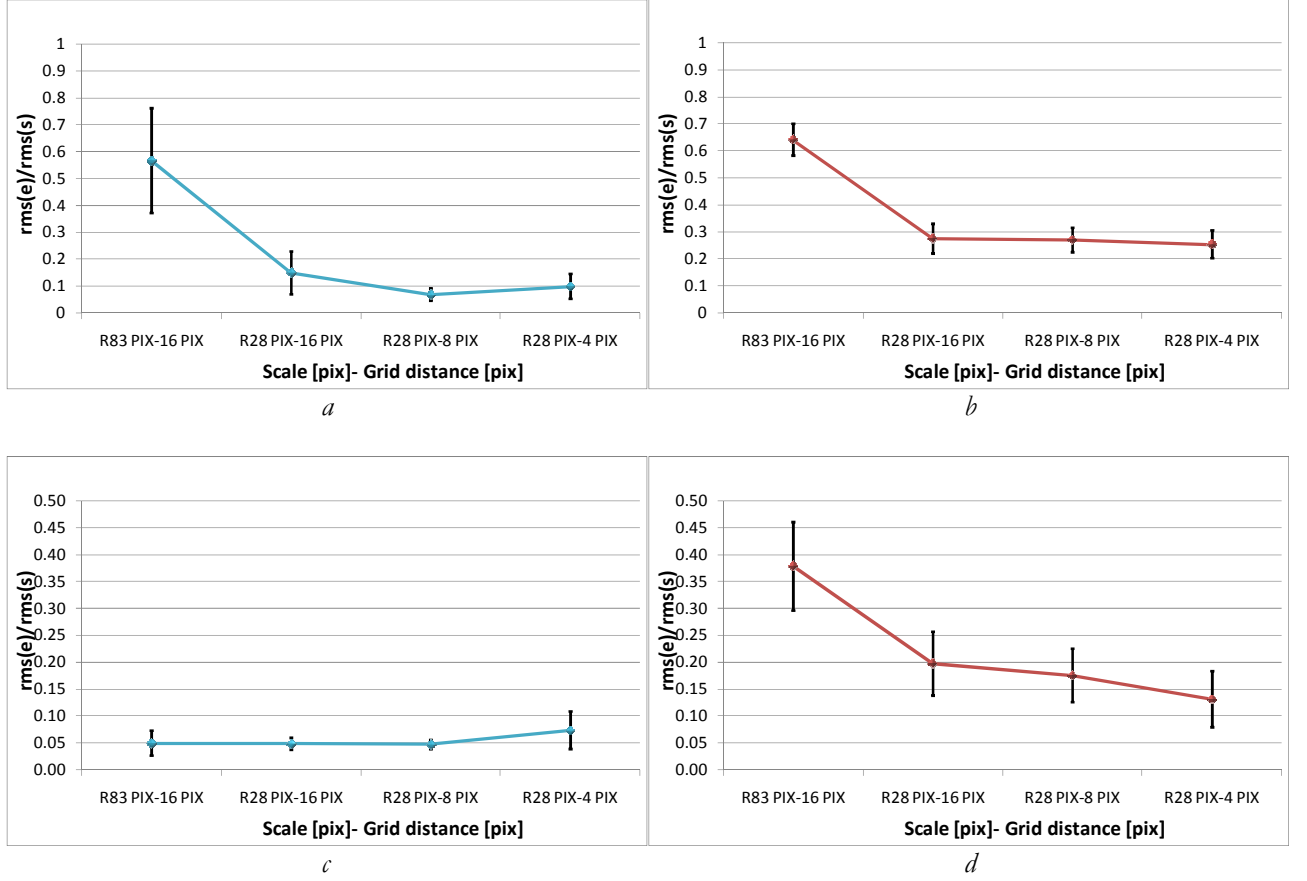
It is convenient to focus on maximum vorticity that can be correctly measured. For this task two peak vorticity cases are of interest:  $\omega_p \sim 1.8 \Delta t^{-1}$  and  $\omega_p \sim 1.5 \Delta t^{-1}$ . Resumes for the results obtained in terms of normalized algorithm errors of the two advanced algorithms changing scales and resolution are given in figure 7.3.3.

Figures 7.3.3a and 7.3.3b correspond to the  $\omega_p \sim 1.8 \Delta t^{-1}$  case. Both algorithms being compared show improvement when the scale of the vortex is reduced ~from  $R_0 = 6$  mm ~83 pixels to  $R_0 = 2$  mm ~28 pixels. This is due to the smaller displacements in the flow field that allows for a higher signal to noise ratio in the first iteration of the algorithms. This first iteration has no hint of the flow field under study and the interrogation windows are focus on the same location for the first and second PIV image with no shift between them or image distortion to help in the location of large displacements.

Reducing the grid distance from 16 to 8 pixels allows for a better description of the flow field due to the higher number of vectors per surface unit. This improves slightly the results. The same tendency is not observed when further reducing the grid distance to 4 pixels. This can be explained

because of the lower number of particles associated to each vector causing a reduction on robustness.

Figures 7.3.3c and 7.3.3d correspond to the  $\omega_p \sim 1.5 \Delta t^{-1}$  case. The difference between the performances of the two advanced algorithms is evident showing errors of the Stereo-LFC PIV smaller than 10% for all the scales and at the resolutions analysed in this Thesis.



**Figure 7.3.3:** Comparison of the normalized algorithm error for vortices of  $\omega_p = 1.8 \Delta t^{-1}$  (a and b) and  $\omega_p = 1.5 \Delta t^{-1}$  (c and d) for different vortex sizes and vector grid distances. **a-c)** Error relative to the two in-plane components of the velocity for the Stereo LFC-PIV. **c-d)** Same error for Stereo Multigrid PIV ( $ov = 50\%$ ).

### 7.3.2. Out-of-plane displacement tests

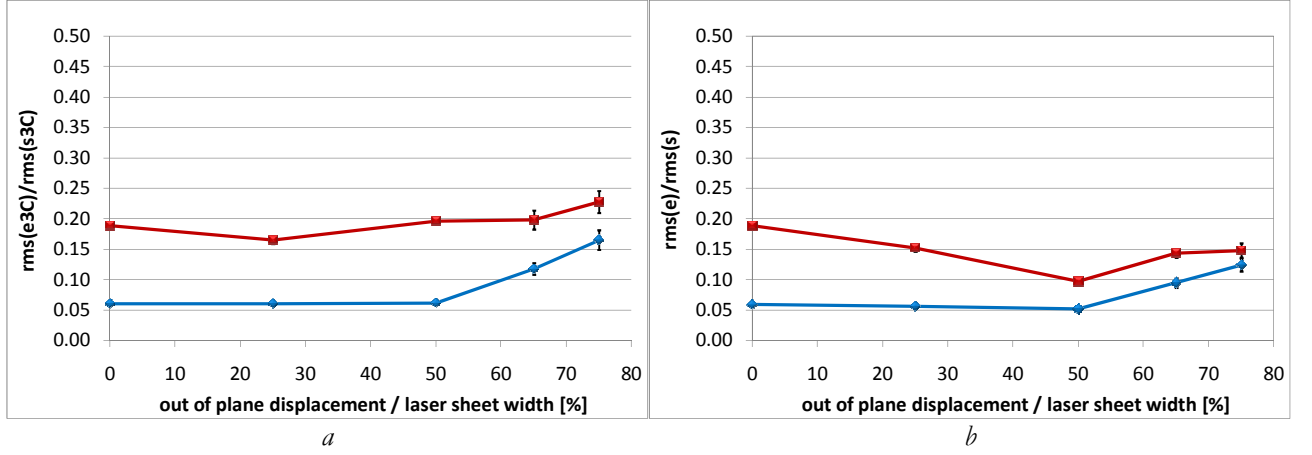
The previous subsection indicates that a Stereo-LFC PIV algorithm can measure higher vorticities than the Multigrid approach for small scale vortices. This conclusion agrees with the large scales case allowing to increase the time between light pulses to obtain larger dynamic ranges for the measurement of vorticity and velocity in a certain flow field. Consequently, as happened with large scales, the study of how much out-of-plane loss of particle pairs is tolerable by the algorithm is customary.

For this evaluation, synthetic images that correspond to the vortex used in the previous section with  $\omega_p = 0.06 \Delta t^{-1}$ , with different out-of-plane velocities were generated. The out-of-plane component is a uniform translation in the first set of images (figure 7.3.4) but corresponds to the Gaussian profile commented in chapter 6 for the second one (figure 7.3.5). In this last case, the out-of-plane percentage value plotted in the figure corresponds to the center of the vortex.

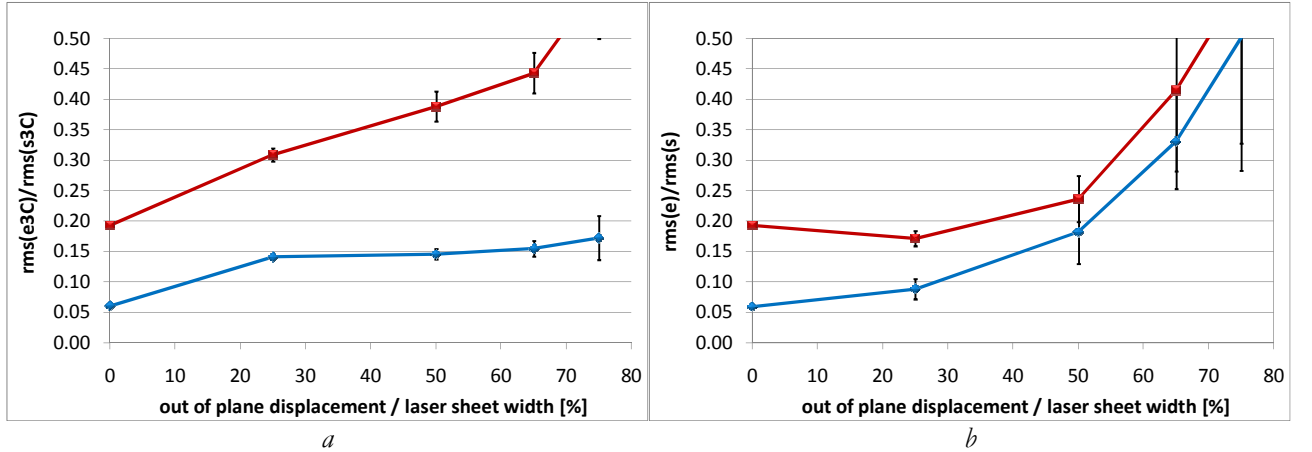
As commented in section 7.1.1 the Multigrid approach used for this first case corresponds to  $Ws = 32$  pixels,  $ov = 50\%$ . For both algorithms being compared the grid distance is 16 pixels.

In both cases, in addition to the normalized error corresponding to the three components of the velocity, the one corresponding just to the two components involved in the rotation is presented. This allows evaluating the accuracy of the description of a small rotation in presence of large out-of-plane displacements. In particular, at locations where the error in the measurement of the out-of-plane is negligible, the role of this component on the denominator of the normalized error reduces the influence of the rotation measurement error even for inadequate measurements of the rotation.

Conversely, if the normalized 3C error is larger than the 2C one there is an indication of a special difficulty in measuring the out of plane component even when the rotation can be evaluated by the algorithm.



**Figure 7.3.4.** Comparison of the normalized algorithm error for small vortices of  $\omega_p < 0.06 \Delta t^{-1}$  and different uniform out-of-plane displacements. Same code for symbols than figure 7.2.1. a) Error relative to the two in-plane components of the velocity (rotation movement). b) Error including the three components of the velocity.



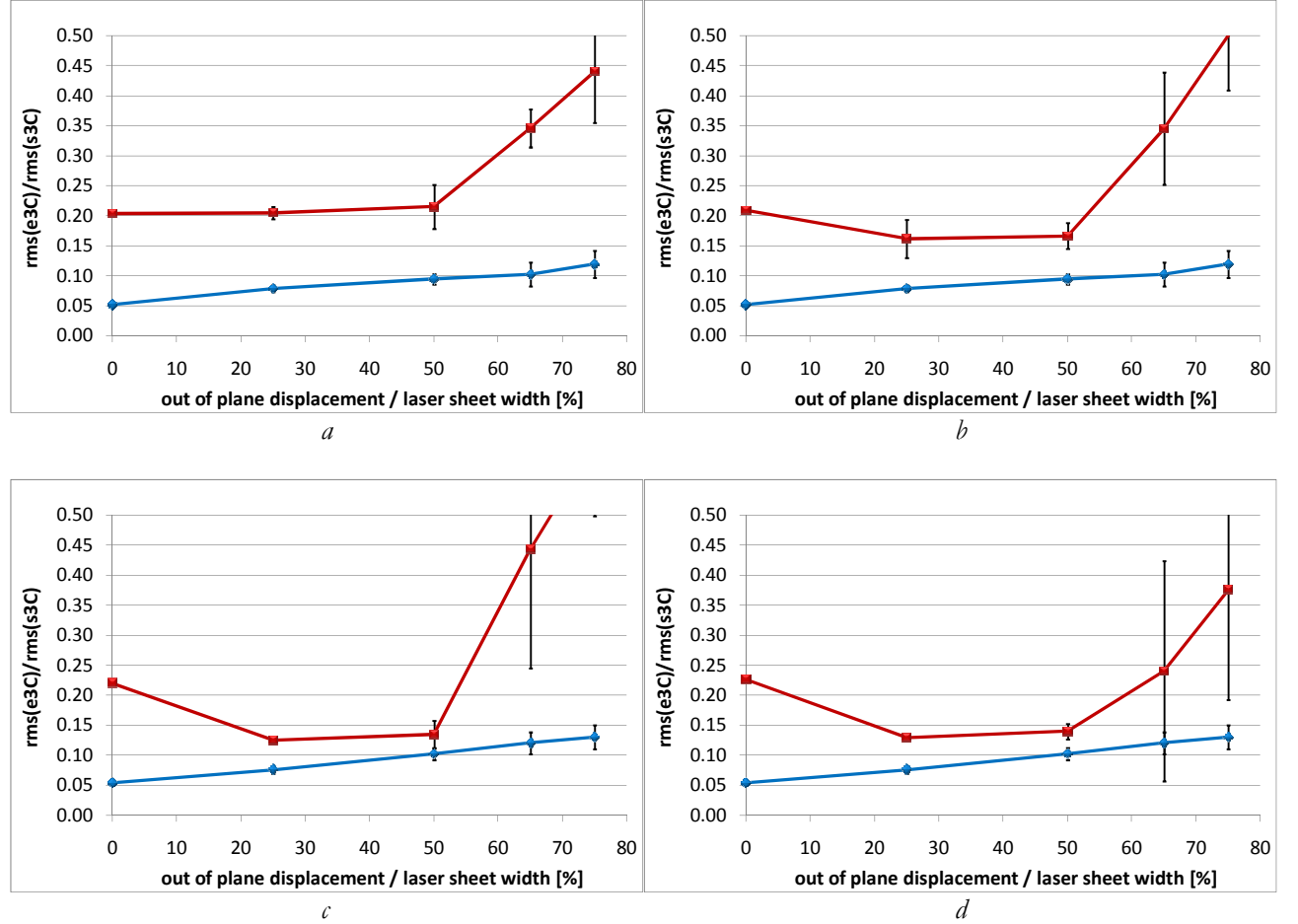
**Figure 7.3.5.** Comparison of the normalized algorithm error for small vortices of  $\omega_p < 0.06 \Delta t^{-1}$  and different Gaussian out-of-plane displacements. Same code for symbols as in figure 7.2.1. a) Error including the three components of the velocity. b) Error relative to the two in-plane components of the velocity (rotation movement).

For all the cases the Stereo-LFC PIV algorithm performs better and with less variability. The difference between the two algorithms is more evident when dealing with a gradient in the third component. For these low vorticities, in some cases, Multigrid Stereo PIV, enhanced with image distortion, presents errors  $> 20\%$  even for a reasonable out-of-plane loss of particles of the 25%.

In general, the 3C normalized error is larger than the 2C one corresponding to the rotation, indicating that the out of plane movement is the main difficulty of this measurement. However, this is not so for the Stereo-LFC PIV performance in figure 7.3.5 for large out-of-plane displacements. This seems to indicate that the existence of gradients in the out-of-plane displacement raises special

difficulties for the measurement of the rotation that were not raised by the uniform translation. This supposition is also supported by the close performance of both methods in figure 7.3.5b.

Like in the previous section, a deeper analysis in the resolution capabilities of the two advanced algorithms has been performed for this case of Gaussian out-of-plane displacement. The results for the normalized error relative to the three components of velocity depicted in figure 7.3.6 show improvements in the results of the Stereo LFC-PIV coherent with an increase of the resolution of the algorithm. The differences between the two algorithms grow with the particle loss, both in terms of average error and dispersion. The Stereo LFC-PIV performs considerably better than the Stereo Multigrid enhanced with image distortion.

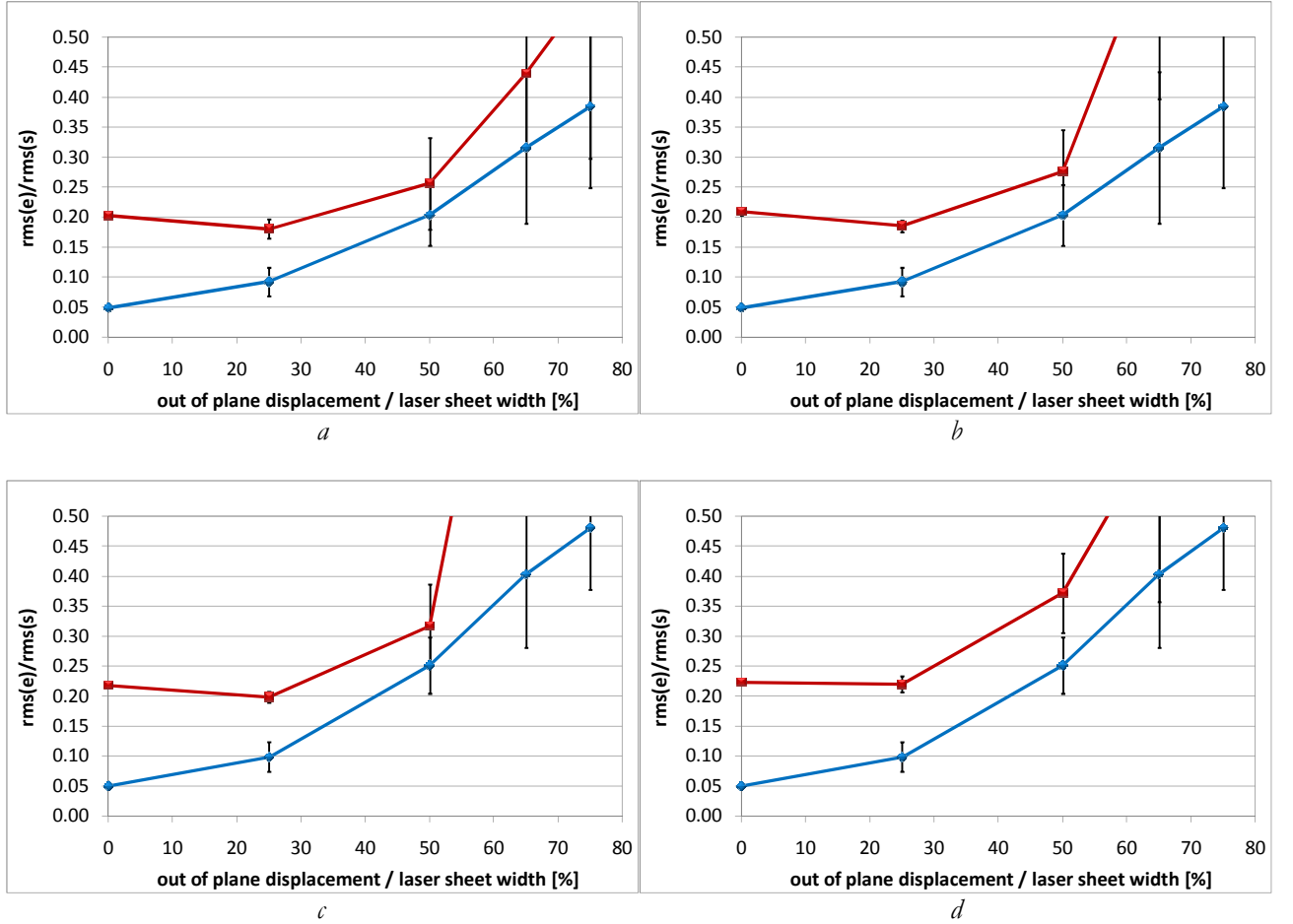


**Figure 7.3.6:** Comparison of the normalized algorithm error (including the three components of the velocity) for small vortices of  $\omega_p < 0.06 \Delta t^{-1}$  and different Gaussian out-of-plane displacements. **a)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 32$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **b)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$ ), **c)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **d)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 8$  pixels,  $ov = 50\%$ ). Same code for symbols as in figure 7.2.1.

In respect to the Multigrid approach, the performance observed has a relevant coincidence with figure 7.3.2. For a given grid distance between vectors, the results obtained with 50% overlapping are generally better than those obtained with 75% overlapping. This is coherent with frequency response of the smaller interrogation window used. Nevertheless, the difference is small, showing the influence of the 3 by 3 vectors smoothing. Between the cases  $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$  and  $W_s = 8$  pixels,  $ov = 50\%$  also the difference is small. This may indicate that the loss of robustness because of the size reduction starts to be noticeable. This last consideration is arising with images in absence of noise and with high particle concentration. Chapter 8 shows that for real images this

phenomenon is evidenced for larger window sizes precluding the use of small windows in general situations.

In respect to the rotation, figure 7.3.7 shows the performance of the algorithms being compared for the two in-plane components. The results coincide with the observation in figure 7.3.5b, supporting that the existence of gradients in the out-of-plane displacement raises special difficulties for the measurement of the rotation. The in-plane measurement suffers of a considerable error and dispersion even for the Stereo LFC-PIV when the out-of-plane particle loss exceeds 65%. Still the error associated to the combination proposed in this Thesis is considerably smaller than the one associated to the Stereo Multigrid enhanced with image distortion. In addition, acceptable performance values are obtained by such combination, when the out of plane displacement is smaller than 50%.

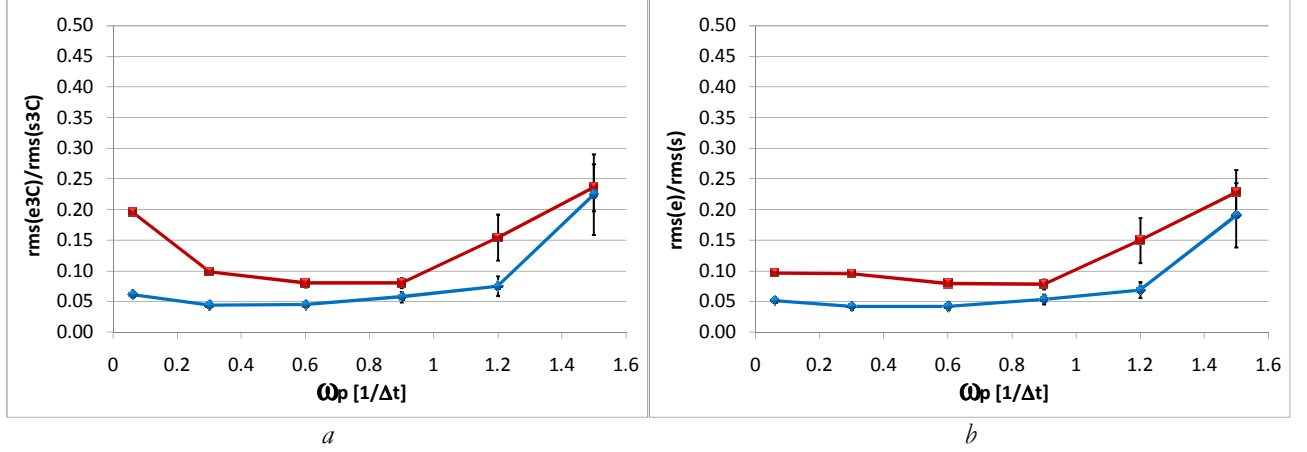


**Figure 7.3.7:** Comparison of the normalized algorithm error (relative to the two in-plane components of the velocity) for small vortices of  $\omega_p < 0.06 \Delta t^{-1}$  and different Gaussian out-of-plane displacements. **a)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 32$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **b)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$ ), **c)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **d)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 8$  pixels,  $ov = 50\%$ ). Same code for symbols as in figure 7.2.1.

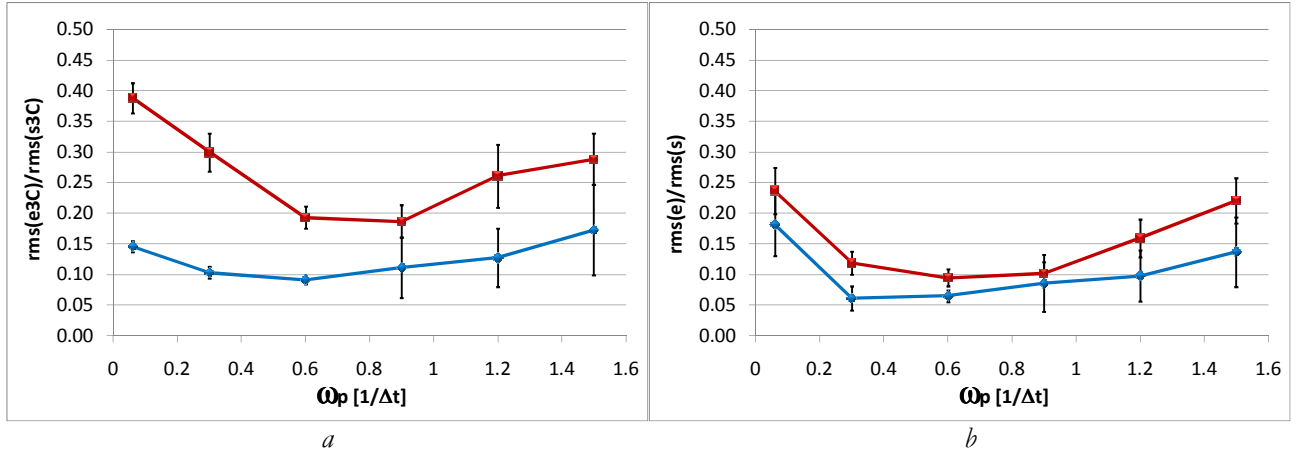
### 7.3.3. Vorticity combined with out-of-plane displacement tests

One last test has been run on synthetic images, now combining different vorticities with a significant out-of-plane displacement (50% of the laser sheet width). The results are presented in figure 7.3.8 and 7.3.9, for a grid distance of 16 pixels for both algorithms and  $W_s = 32$  pixels in the last iteration of the Multigrid approach. The first image corresponds to a uniform out-of-plane

displacement and the second to a Gaussian one. As the flow field complexity grows, also in terms of out-of-plane velocity profiles, the difference between the two algorithms is more evident.



**Figure 7.3.8:** Comparison of the normalized algorithm error for small for small vortices and 50% particle loss and uniform out-of-plane displacements. Same code for symbols as in figure 7.2.1. **a)** Error including the three components of the velocity. **b)** Error relative to the two in-plane components of the velocity (rotation movement).



**Figure 7.3.9:** Comparison of the normalized algorithm error for small vortices and 50% particle loss and Gaussian out-of-plane displacements. Same code for symbols as in figure 7.2.1. **a)** Error including the three components of the velocity. **b)** Error relative to the two in-plane components of the velocity (rotation movement).

In respect to the performance depicted in figure 7.3.1 for the in-plane vortices, the results for the uniform out-of-plane displacement show a stronger effect on Stereo-LFC PIV performance. Nevertheless, its error values remain smaller than those of the Multigrid approach. For the Gaussian out-of-plane, the 3C measurement (figure 7.3.9a) worsens noticeably respect to the in-plane movement. This indicates that the out-of-plane movement is a difficulty comparable with the rotation. The difference in performance of the two algorithms compared is evident in figure 7.3.9a. Similarly to the previous sections, once the synthetic images have been analyzed with a relative low resolution, the effect of the reduction of the grid distance and the window size has to be characterized.

Figures 7.3.10 and 7.3.11 plot the performance for the 3C normalized error and the 2C one respectively. Both cases correspond to the Gaussian out-of-plane displacement. The Stereo-LFC PIV shows better performance than in figure 7.3.9 except for the two in-plane components of the velocity at the low vorticity case ( $\omega_p = 0.06 \Delta t^{-1}$ ). In addition for all the cases with larger vorticities, figures 7.3.10 and 7.3.11 indicate that the 3C normalized error is slightly larger than the 2C one for

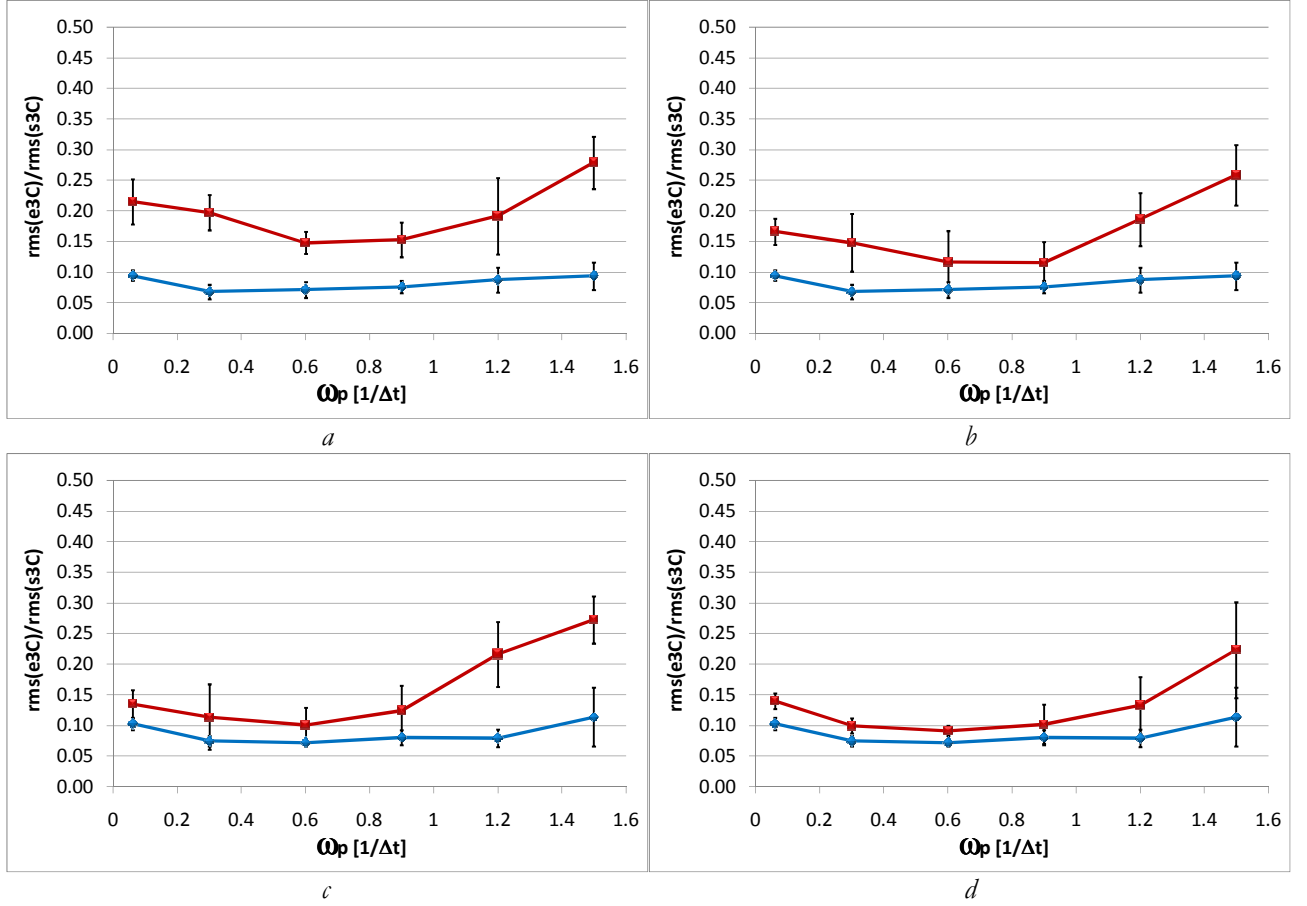


this algorithm. This indicates again that the difficulties associated to the measurement of the out of plane velocity gradients included in the image are comparable to those associated to the measurement of the rotation.

The Stereo-Multigrid PIV for grid distance of 4 pixels approach to some extent the performance of the Stereo-LFC PIV. This result is coherent with the increase of frequency response of these analyses and with the lack of image noise of the synthetic images.

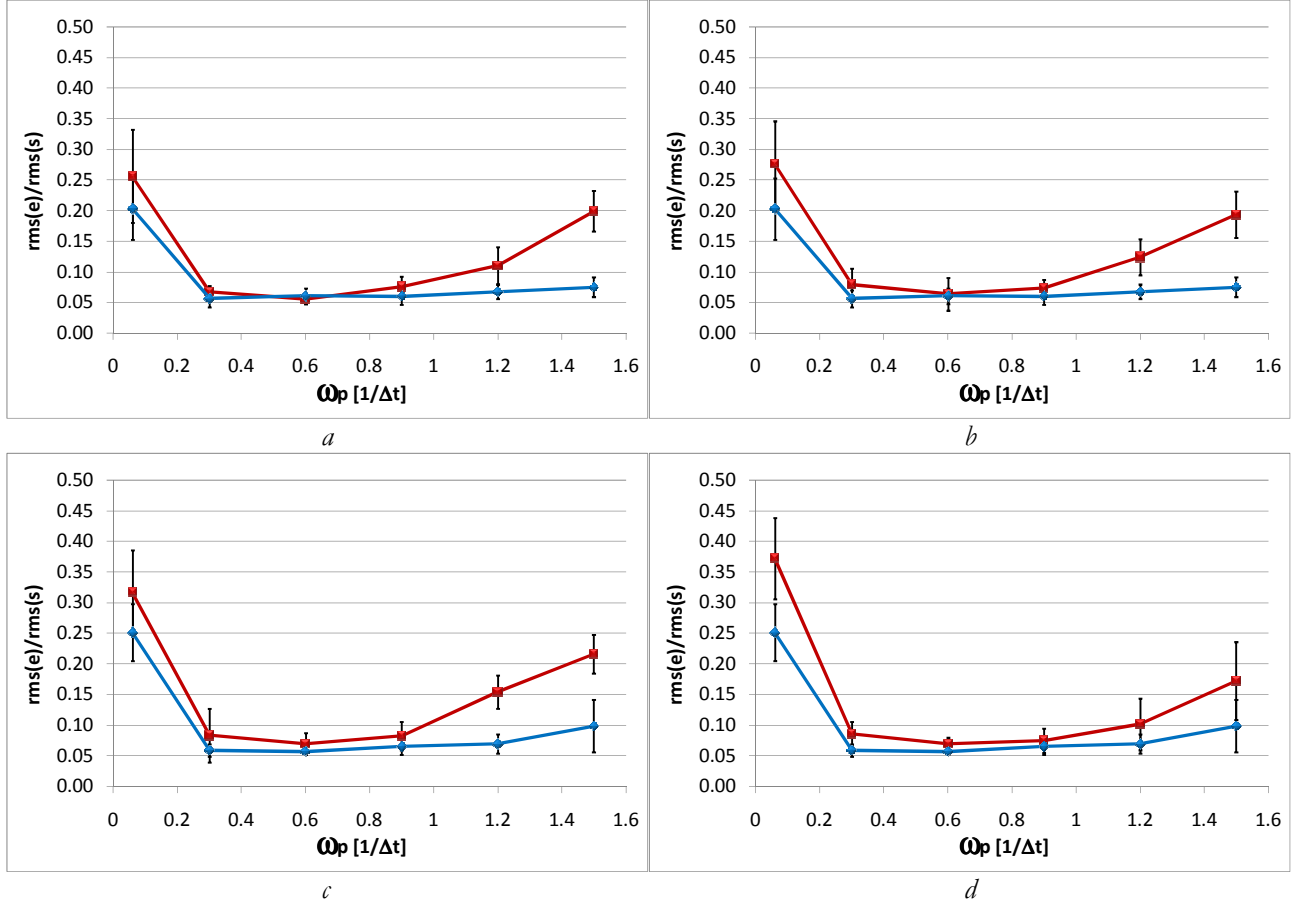
In addition to that, the dispersion of the results of the Stereo-LFC PIV is noticeable smaller than the one of the Stereo-Multigrid PIV.

Both issues encourage the analysis on real images to further evaluate robustness issues.



**Figure 7.3.10:** Comparison of the normalized algorithm error (including the three components of the velocity) for small vortices and 50% particle loss and Gaussian out-of plane-displacement. **a)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 32$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **b)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$ ), **c)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **d)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 8$  pixels,  $ov = 50\%$ ). Same code for symbols as in figure 7.2.1.





**Figure 7.3.11:** Comparison of the normalized algorithm error (relative to the two in-plane components of the velocity) for small vortices and 50% particle loss and Gaussian out-of plane-displacement. **a)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 32$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **b)** grid distance 8 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$ ), **c)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 16$  pixels,  $ov = 75\%$ ), **d)** grid distance 4 pixels ( $W_s = 8$  pixels,  $ov = 50\%$ ). Same code for symbols as in figure 7.2.1.

## 7.4. Resume of the study on synthetic images

All along section 7, different issues on measurement performance have been assessed. A total of 480 PIV images have been analyzed. In these images with no error beside discretisation, the following results for the Stereo-LFC PIV algorithm have been obtained:

- It has shown better performance than Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion for all the cases studied. This indicates that the theoretical considerations made in subsection 6.4.2 in relation to the two approaches (smoothing vs. measurement of error) are coherent with the PIV results. This is so despite that reasoning is done using the moving average paradigm instead of the non-linear PIV operations.
- It is able to measure with normalized algorithm error below 15%, in situations characterized by combinations of: out-of-plane displacements up to 50% of the laser sheet width, vorticities in the range from  $\omega_p = 0.06 \Delta t^{-1}$  to  $\omega_p = 1.5 \Delta t^{-1}$ , vortices with radius in the range from 86 to 28 pixels and gradients in the out-of-plane component of similar scale.
- Considering only the two in-plane components of the velocity, a normalized 2C error reaching higher values than 15% cannot be avoided only for the case of small scale,  $\omega_p = 0.06 \Delta t^{-1}$  and Gaussian out-of-plane displacements profile reaching 50% of the laser sheet width. In this case an error of 20% is the smaller one obtained for a grid distance of 8 pixels.

- Generally, the dispersion of the error is significantly smaller than that of Multigrid PIV enhanced with image distortion. This indicates a smaller variability of the measurement in relation to the random location of the seeded particles.

In the analysis, the Multigrid PIV enhanced with image distortion has shown two relevant details:

- For the small scale case its performance improves when reducing from  $W_s = 32$  pixels to  $W_s = 16$  pixels, but does not vary too much for further reduction to  $W_s = 8$  pixels. For cases with low error, this could be interpreted as the lack of need for higher resolution. Nevertheless, in the cases with significant error it may indicate that for  $W_s = 8$  pixels, even for this synthetic cases with no image noise apart from discretisation, the increase of resolution capability is impaired by the lack of robustness. Real images further illustrate this point in chapter 8.
- In any case,  $W_s = 32$  pixels with  $ov = 50\%$  seems to show noticeable effects ( $\sim 5\%$ ) from lack of spatial resolution when dealing with vortices of  $R_0 \sim 28$  pixels.

## 8. APPLICATION TO REAL IMAGES

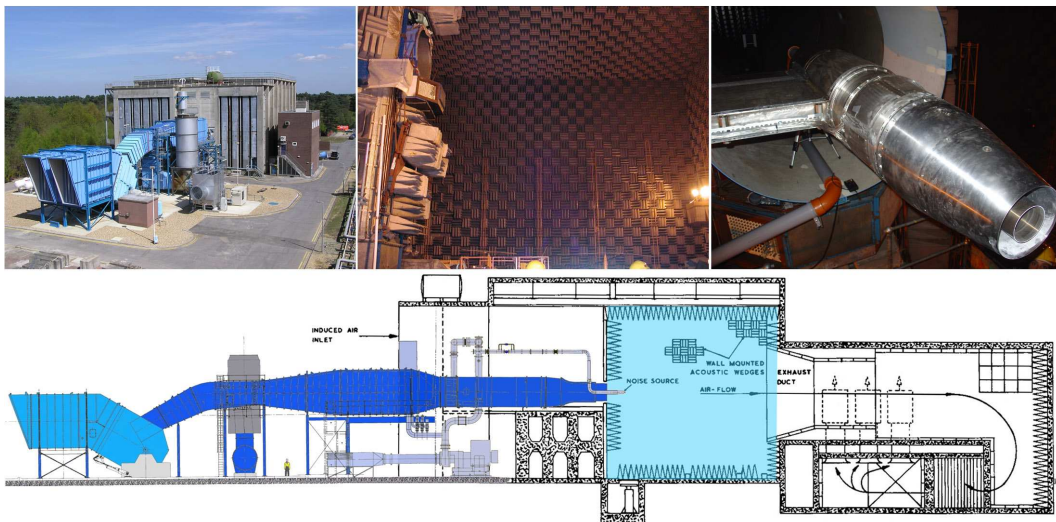
The study presented in chapter 7 has been performed on synthetic PIV images. These images act as a powerful tool that allows exposing particular details and reveal the underlying mechanisms. Nevertheless, the final objective of this Thesis is the application of the combination under study on real images.

Even though the detailed flow field is unknown, thus impeding to offer measurements of the error, the measurements allow checking the coherence between the results found with synthetic images and those with real ones.

As reported in the introduction, the first project financing this work of Thesis (DPI2002-02453 “Técnicas avanzadas de Velocimetría por Imagen de Partículas (PIV) Aplicadas a Flujos de Interés Industrial”) was directed to the understanding and implementation of the Stereo PIV techniques and its combination with advanced 2D2C techniques. In this direction, a first measurement campaign was performed at laboratory scale and it is presented in section 8.1.

This test campaign also activated a first step to launch the participation of our group in the Cojen European project (Coaxial Jet and Noise European project, Specific Targeted RESEARCH Project EU Contract No. AST3-CT-2003-502790). In this situation, the principal objective of this Thesis expanded from studying and developing a new technique to include its application to measurements in an industrial environment, which had the primary purpose of validating numerical methods and required special attention to accuracy.

The experimental part of this work has been performed at the QinetiQ NTF (Noise Test Facility) in Farnborough UK, one of the largest jet noise wind tunnels in the world. Even for this large anechoic chamber (figure 8.1), the nozzle model sizes have to be down-scaled by a factor of 10 in respect to the large commercial aircraft ones. This is in order to properly asses the whole plume characteristics within a reasonable scale, among other issues. Despite this general reduction in size, for a particular model of the nozzles under study, the thickness of the lip has not been down scaled. This allows studying the effects behind a full scale lip, as the effects close to the lip are not related to the diameter of the nozzle. Besides that, the velocity and temperature conditions of the experiments are the ones of the real jet.



**Figure 8.1:** QinetiQ Noise Test Facility used in the measurements campaign of the Coaxial Jet Noise European Project. The images above the blueprint represent from left to right: (i) The whole facility, (ii) The almost cubic anechoic chamber shadowed below. The jet nozzle is not installed here. The blue nozzle up to the left corresponds to the flight stream blower, 8 meters above the floor of the chamber. (iii) Jet nozzle installed in the flight stream blower.

## 8.1. Small facility experimental set up

This section details the initial tests designed to check the suitability of the Stereo-LFC-PIV method on a real experiment. Additionally, the flow conditions on the images to acquire are designed to study the mentioned coherence with the particular results obtained on the synthetic images from the previous sections. This is the first time that Stereo-LFC PIV has been used on real images.

In a similar way as in the synthetic image cases, special attention is paid to large displacement gradients and out-of-plane displacements. With these aims, Stereo PIV images have been obtained in a small open jet facility, depicted in figure 8.1.1.



**Figure 8.1.1:** Small test facility and example of seeded jet image

The working fluid is air at atmospheric conditions. The diameter of the jet nozzle (fig 8.1.1) is 50 mm and the flow was set to an average of  $\sim 2$  m/s. The Reynolds number based on the jet nozzle diameter is  $Re_D = 6,600$ .

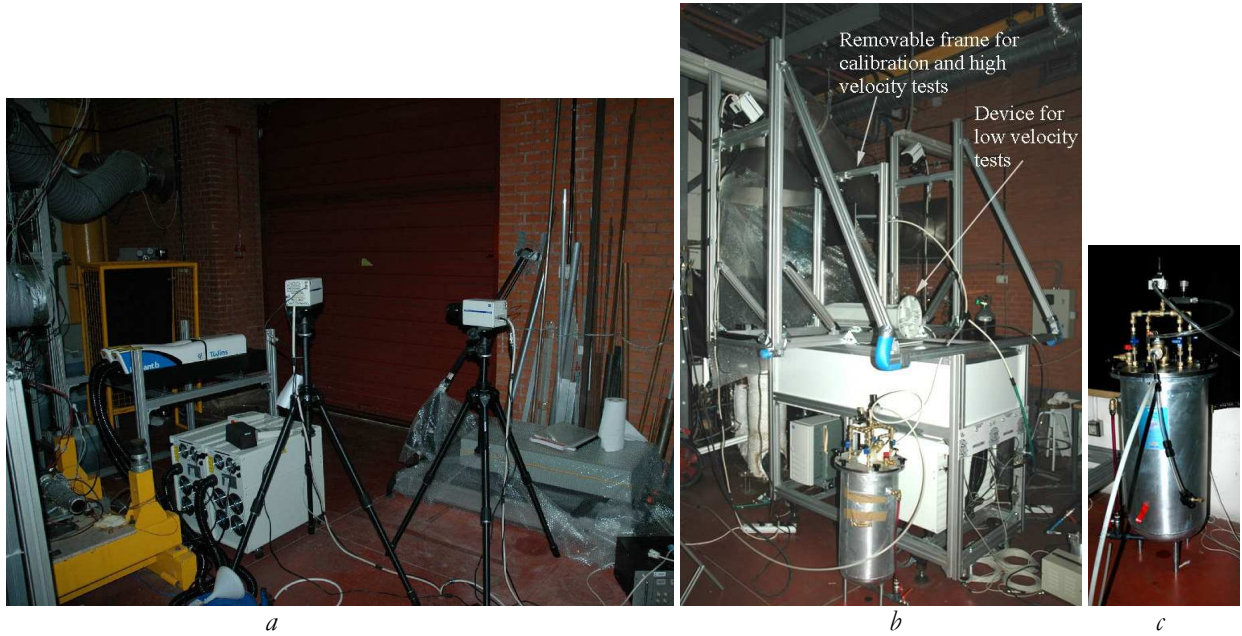
It has been seeded with food-grade glycol droplets of  $\sim 1 \mu\text{m}$  in diameter. This fluid was chosen because of its non-toxicity and the fact that it evaporates after long periods, leaving the laboratory free of residues. The seeding device consisted in several Laskin-like nozzles of known characteristics (fig. 8.1.2 c) (Kähler, Sammler and Kompenhans, 2001).

The images were taken at 4 diameters downstream the exit nozzle. The magnification in the center of the planes corresponds to 14 to 16 pixels/mm, depending on the image.

The Stereo configuration, depicted in figure 8.1.2 b, corresponds to that of the synthetic images (forward-forward scattering Willert configuration at 45 degrees of the laser sheet). This configuration has been chosen as a result of the bibliographic research presented in chapter 5 of this Thesis.

The cameras sensors consist of 2k by 2k pixels with 12 bits sampling. The laser corresponds to a double head NdYag shooting 380 mJ per pulse (fig. 8.1.2 a).

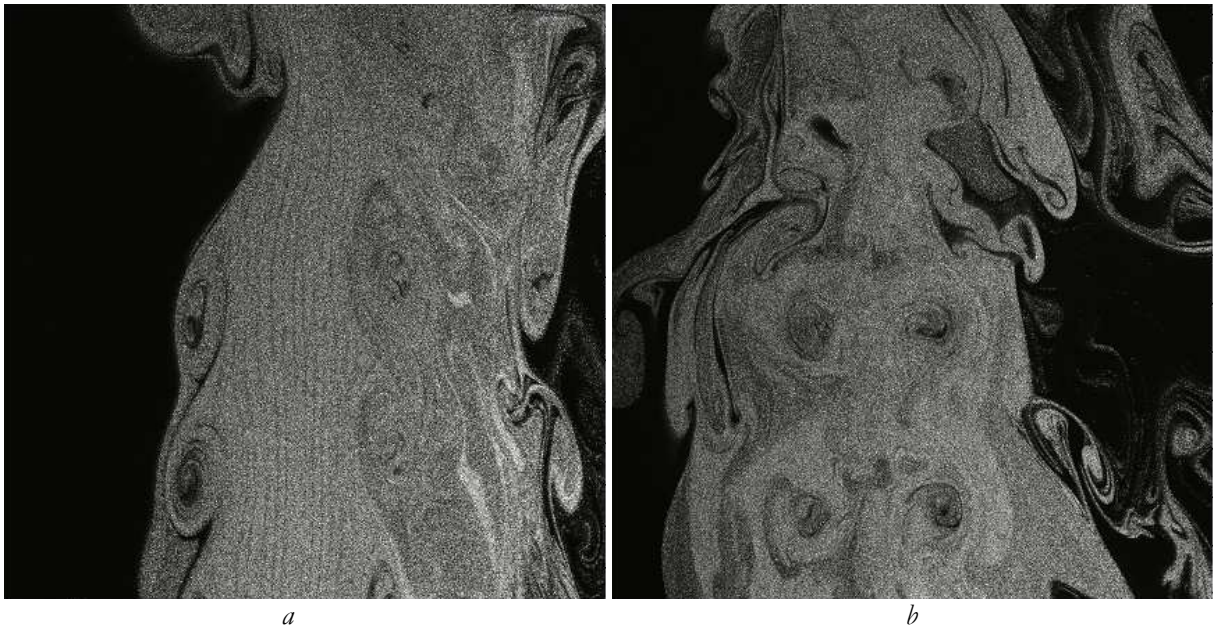




**Figure 8.1.2:** a) Laser and cameras b) Small test facility stereo configuration c) Seeding device

Two different positions were studied:

- To check the cases with no out-of-plane displacement, the laser sheet has been located in a meridional plane of the nozzle. Figure 8.1.3a shows an example of the images obtained in this position.
- For cases with out-of-plane displacement, the laser sheet was located parallel to the previous position but displaced 20 mm off-axis. Figure 8.1.3b shows an example of the images obtained at this position. The vortices are intersected by the laser sheet at a non-perpendicular angle to their axis of rotation. As a result, their rotation generates out-of-plane components of the displacement in addition to the in-plane components



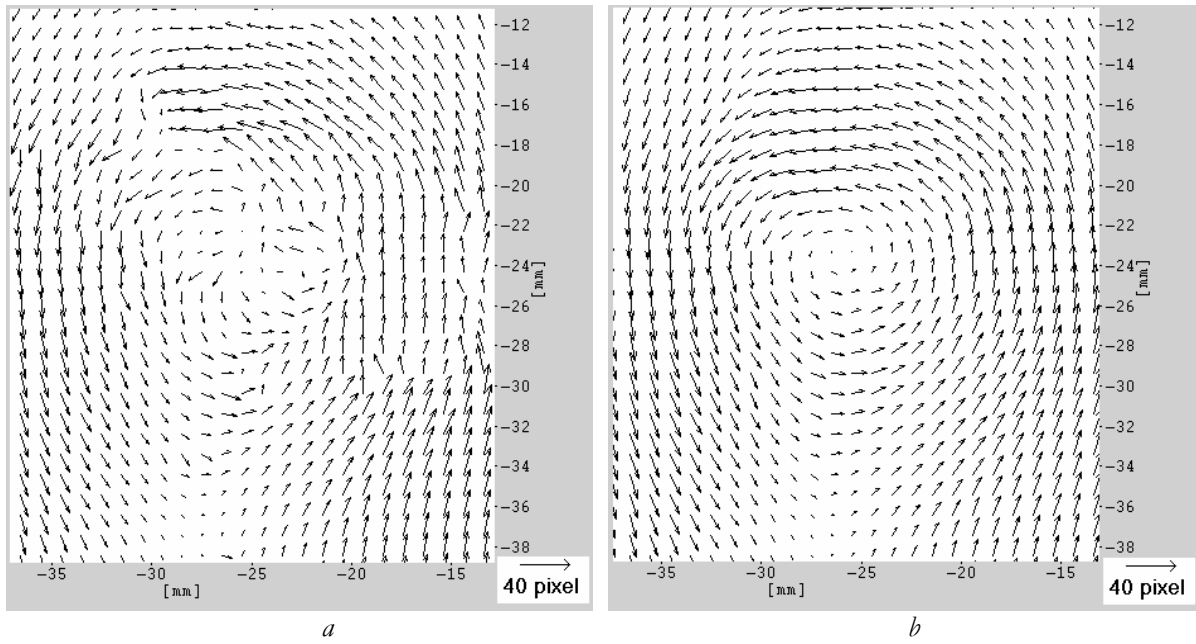
**Figure 8.1.3:** Example of 2k by 2k images of the jet under study. a) Laser sheet located at a meridional plane of the round nozzle. b) Laser sheet parallel to a meridional plane but displaced 20 mm towards the observer.

Images in figure 8.1.3 correspond to low and inhomogeneous seeding in the outside of the jet. These seeding inhomogeneities help the visualization of the flow.

### 8.1.1 Experimental results

Examples of Stereo measurements in both locations are given in figures 8.1.4 and 8.1.5. It should be noticed that only a small portion of  $\sim 400$  by  $400$  pixels are presented out of the  $2k$  by  $2k$  images. These portions are selected out of zones where there are no seeding inhomogeneity difficulties for PIV.

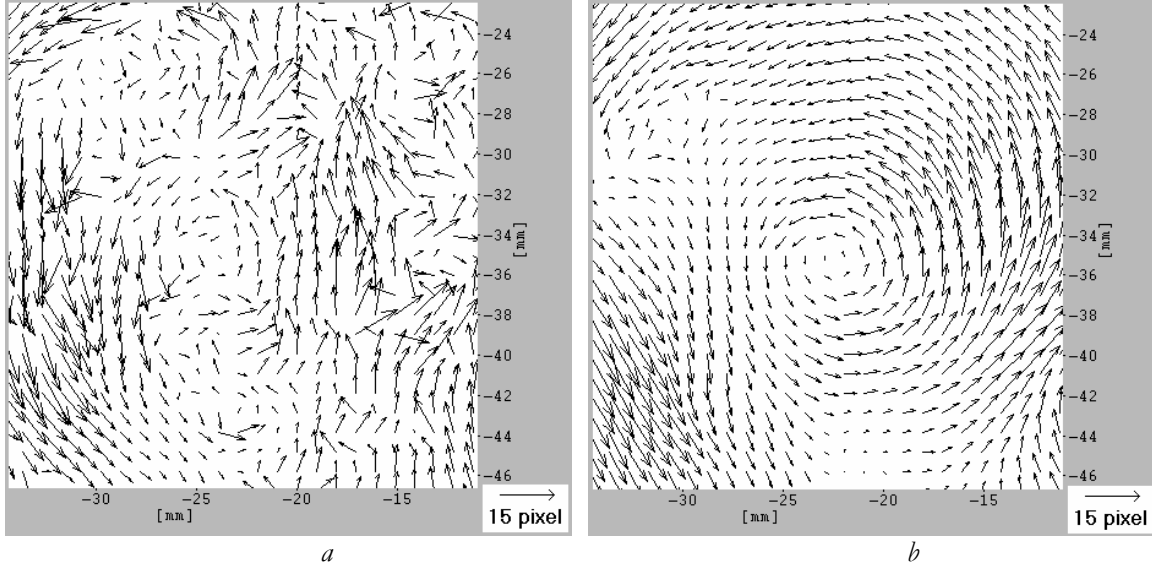
The coherence with the synthetic images measurements cases is clear. Outliers are more evident in the measurement from Multigrid Stereo PIV enhanced with image distortion than in the Stereo LFC-PIV one.



**Figure 8.1.4:** Vector plots for Stereo evaluations of a vortex from figure 8.1.3a. The peak vorticity corresponds to  $\omega_p \sim 1.2 \Delta t^{-1}$  **a)** Measurement with Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion. **b)** Stereo-LFC PIV measurement.

Measurements of the laser sheet revealed an almost Gaussian profile with an  $e^{-2}$  width of  $\sim 2$  mm. In the case depicted in figure 8.1.5, the magnification corresponds to 16 pixels/mm. As consequence of this, the out-of-plane displacement is in the order of 0.5 mm (25% of the plane width). The presence of outliers for this out-of-plane value can be related to the fact that in real images other sources of error makes more difficult for any algorithm to perform satisfactorily.

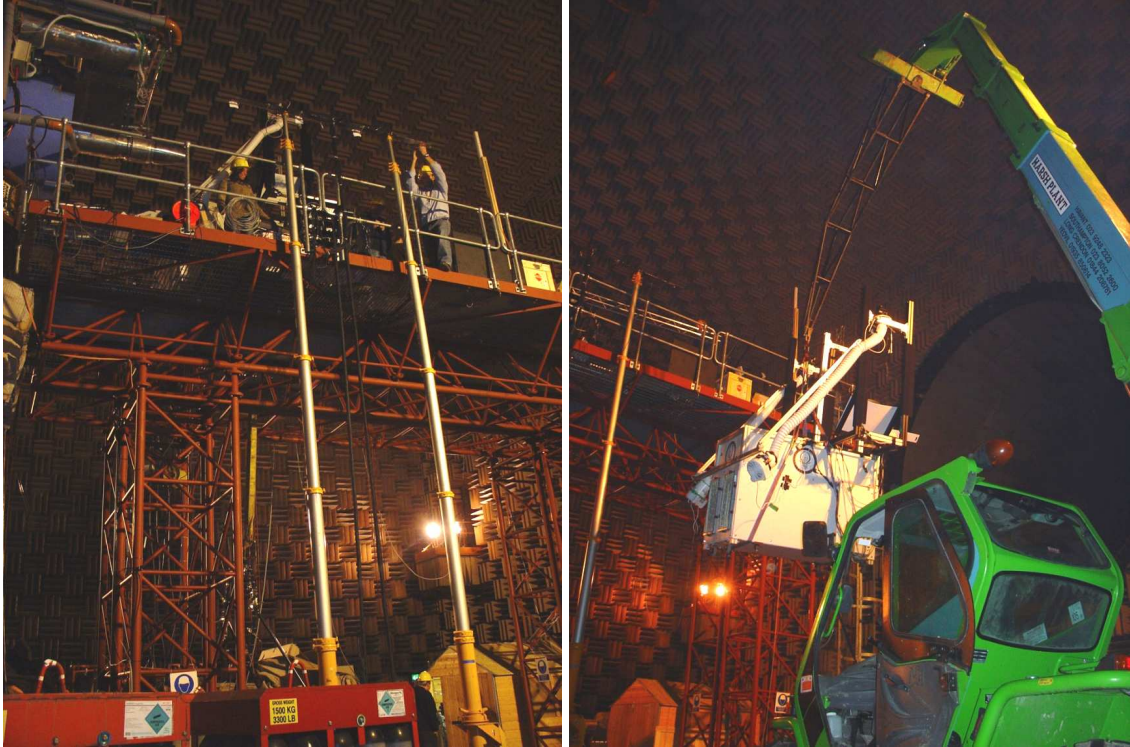




**Figure 8.1.5:** Vector plots for Stereo evaluations of a vortex from figure 8.1.3b. The peak vorticity corresponds to  $\omega_p \sim 0.25 \Delta t^{-1}$ . The out-of-plane component varies from 10.8 pixels in the upper side to -8.5 pixels in the lower part. **a)** Measurement with Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion. **b)** Stereo-LFC PIV measurement.

## 8.2. Semi industrial facility experimental set ups

As commented at the beginning of this chapter the main measurement campaign motivating the developments in this Thesis has been performed at the QinetiQ NTF (Noise Test Facility) in Farnborough UK. This facility (figure 8.1) has the capability of producing large free jets thermally and kinetically stabilized within 0.1% margins.



**Figure 8.2.1:** The NTF rig

To give an idea of the dimensions of the facility, two pictures representing the rig and the Stereo-PIV system being lifted to it are presented in figure 8.2.1.

### 8.2.1 Vortex street at one of the lips of a coplanar nozzle: experimental set-up

The first case studied corresponds to a vortex street detected in a lip of the coaxial nozzle depicted in figure 8.2.2, being the diameter of the core section (primary nozzle) 100 mm and the diameter of the bypass section (secondary nozzle) 200 mm.

Although the core and bypass outlets are initially coplanar, the thermal expansion during operation makes the core outlet lip protrude a couple of millimetres in respect to the bypass one (this can be observed in figure 8.2.4).

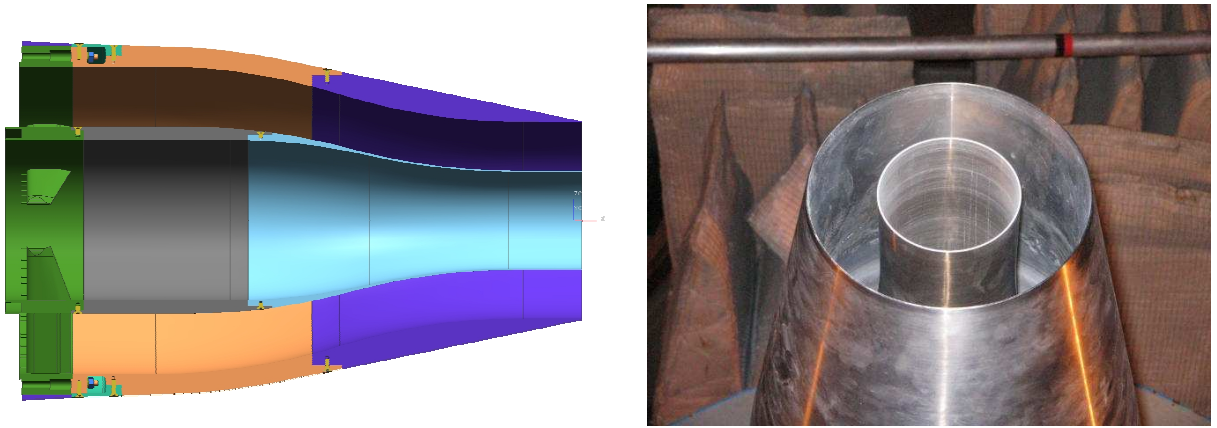


Figure. 8.2.2: The coplanar nozzle

The core flow corresponds to an outlet velocity of 400 m/s and a static temperature of 560° C, the bypass had a velocity of 303 m/s and a static temperature of 53° C, all of them constant over time. The lip between both flows is the one producing the vortex street under study (figure 8.2.4).

It has a thickness of 1mm and is made of solid stainless steel with smooth surface and axial-symmetric construction. Its thickness is almost constant up to 50 mm upstream and then thickens and widens to achieve the required rigidity and smooth flow entrance. The tip ending corresponds to a simple half circle finishing.

The Reynolds number of the flow using the thickness of the lip is  $\sim 4.6 \cdot 10^3$  for the hot flow and  $\sim 2 \cdot 10^4$  for the cold one.



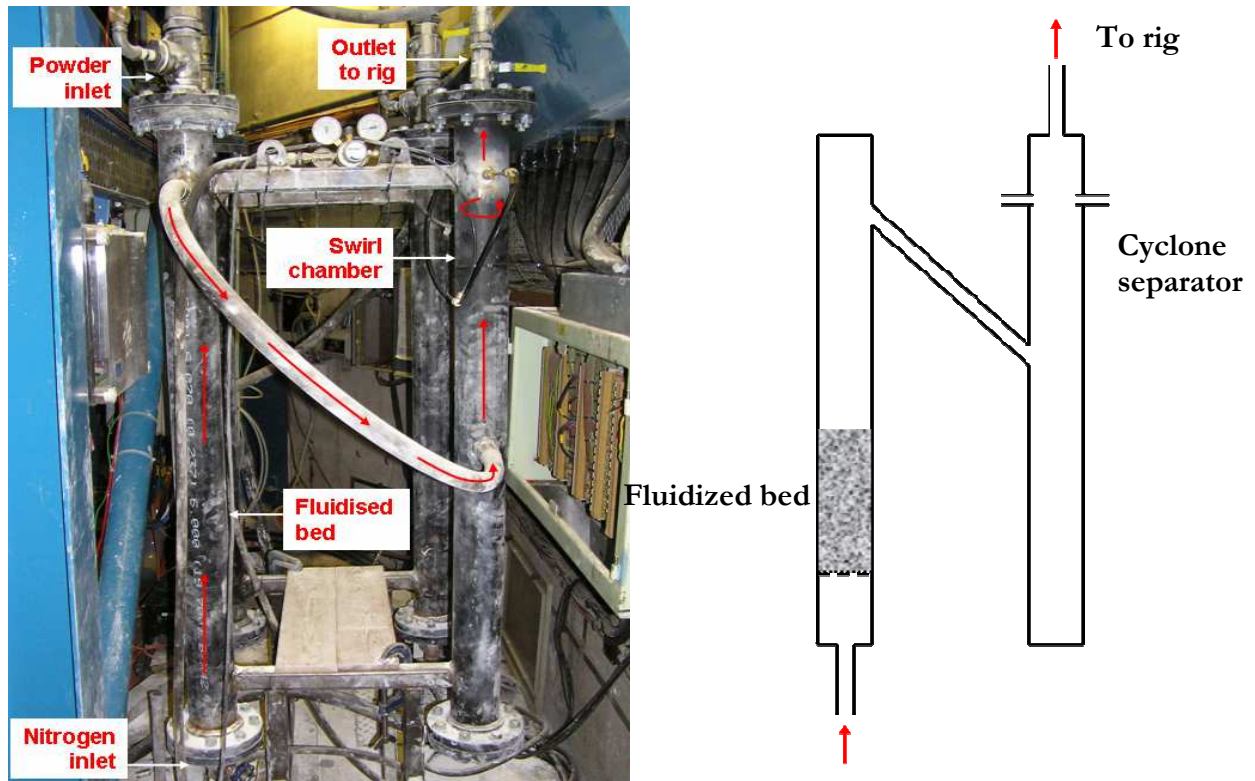
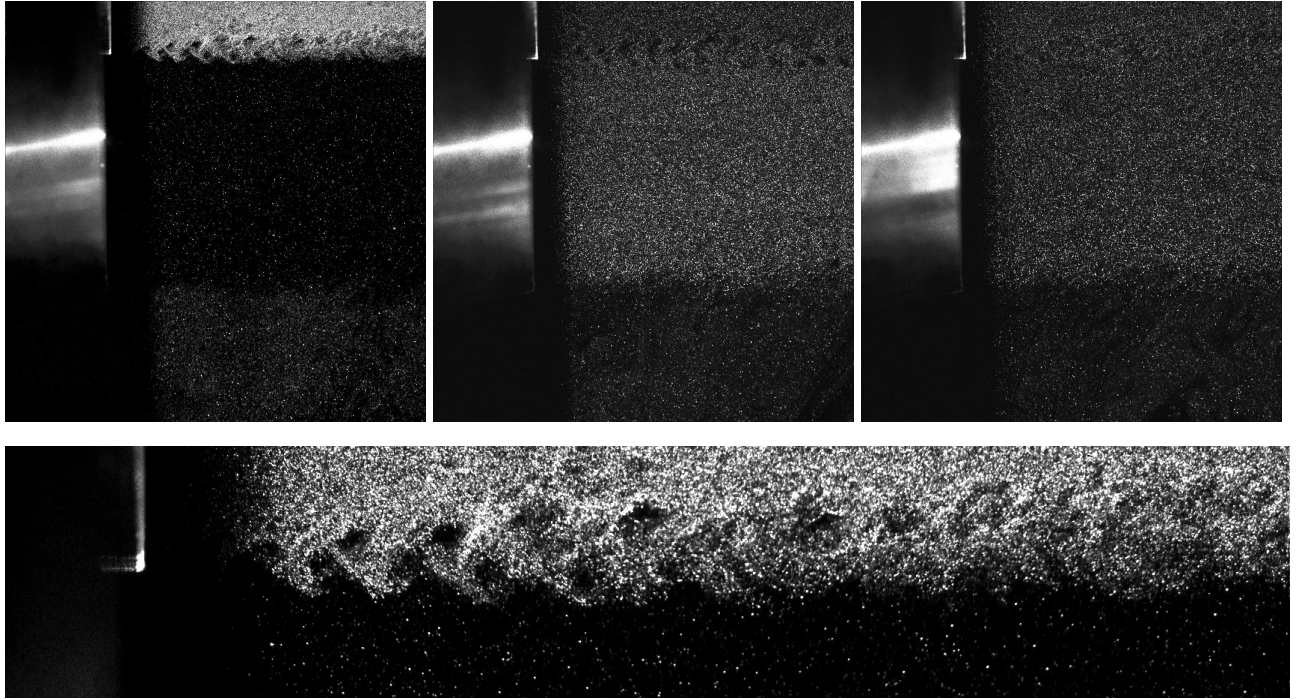


Figure. 8.2.3: The seeder: fluidized bed followed by a cyclone separator

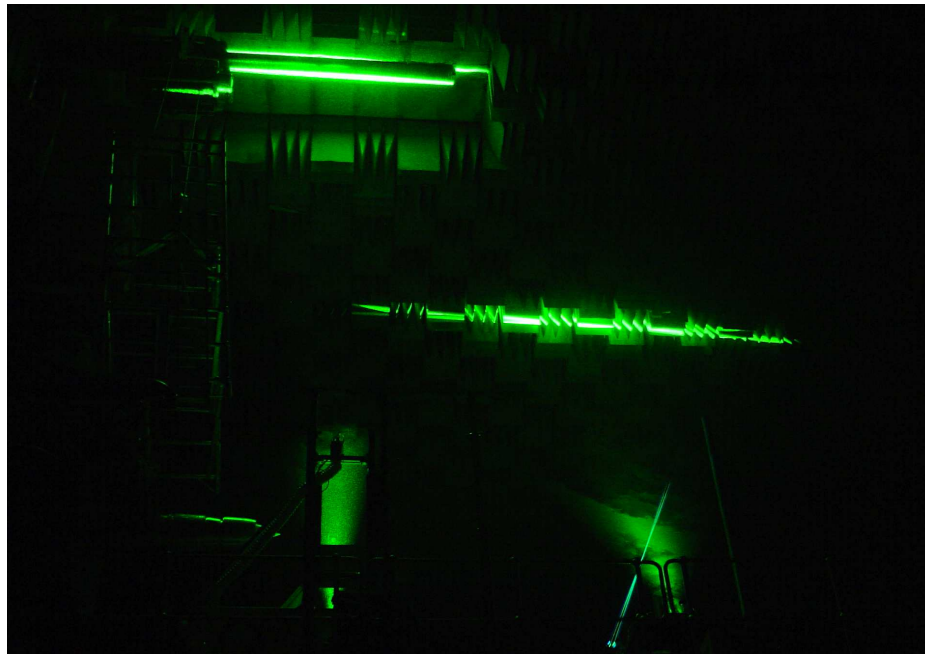
The flow was seeded with commercial 0.3 micron nominal size titanium dioxide particles using a fluidized bed (to avoid agglomeration of the particles) followed by a cyclone separator (to centrifuge the large particles so that only the small ones actually seed the flow)(fig. 8.2.3). This part of the campaign is critical to allow good PIV measurements. The seeding device was developed by Qinetiq, based on the design from Bridges (2002), with the help of other partners. In particular, one of the tasks done within this Thesis was to contribute to the characterization of the seeding by performing preliminary PIV tests, which allowed its visualizations, and preliminary measurement that allowed to evaluate the more appropriate set-up.

In figure 8.2.4, the upper 3 images show the different seeding densities and homogeneities obtained in the facility. The first one, zoomed in the lower image, although not suitable to perform good measurements, helps to visualize the structures present in the vortex street. The third upper image shows optimum seeding density and uniformity for PIV measurements. It should be noted that these images were taken with the camera orthogonal to the laser sheet, within the 2C-2D tests.



**Figure. 8.2.4:** Visualization of the vortex street. Seeding density and uniformity examples

The acquisition system for the PIV measurements consist on a double cavity 380 mJ per pulse Nd-Yag laser form QUANTEL and a LAVISION FlowSense camera of 2k by 2k pixels (fig. 8.1.2a). The repetition rate was around 1 frame per second.

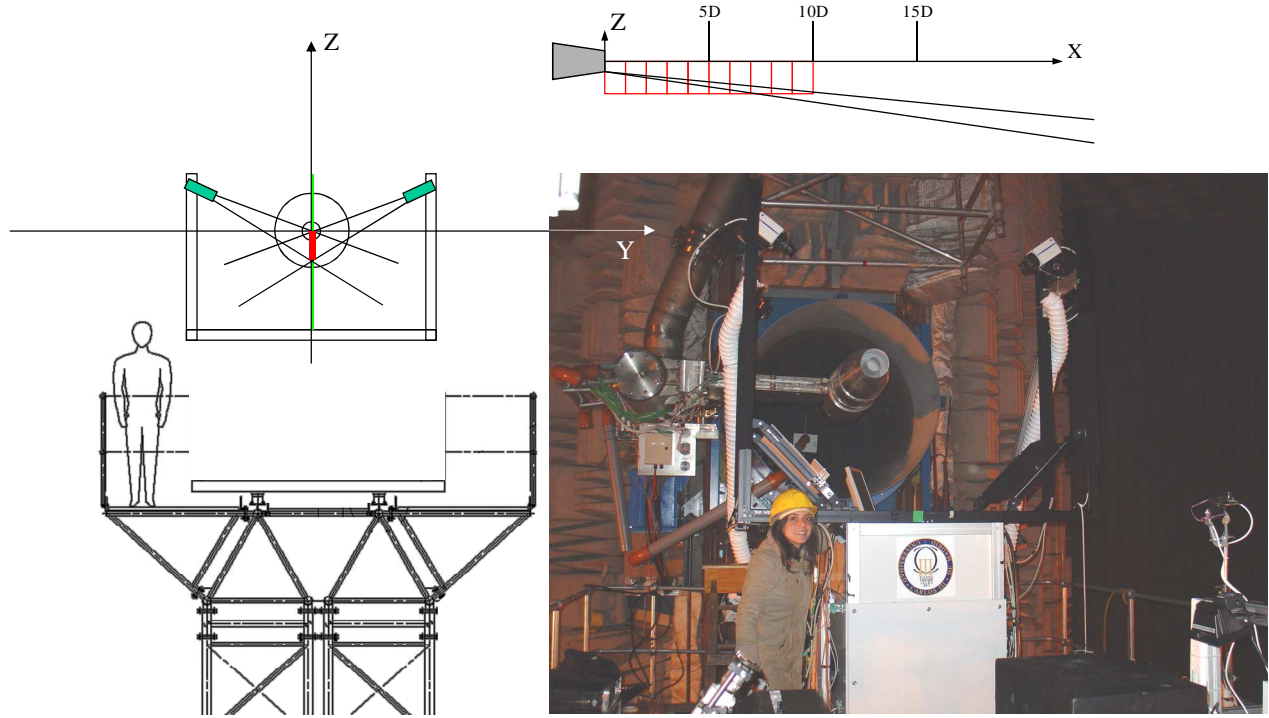


**Figure. 8.2.5:** The Laser: left hand side UC3M laser system, right hand side: other partners system

The amount of illumination provided by the high laser power was fundamental for a good visualization of the flow field. Comparison between these images and those obtained with similar cameras but using other lasers of lower power evidenced this fact. Figure 8.2.5 shows a picture of the experimental setup in operation. The left hand side is the laser corresponding to the measurement performed by the UCIIM group, while the right hand side lasers corresponds to

simultaneous measurements (PIV and LDA) performed by other partners.

The temperature difference between the flows corresponding to the core and bypass of the jet generated optical deflections. Thanks to the proximity between the measured structures and the temperature gradient zone, these effects were small. Theoretical estimations indicate position errors smaller than 0.05 mm. In addition, the short time between laser pulses freezes the flow structures that may modify the optical deflection. Very similar deflection is expected for each particle image in a particle pair, reducing the error for velocity calculations to less than 0.01 mm (7.7 m/s). This value is similar to PIV errors coming from other sources and allows reasonable measurements.



**Figure. 8.2.6:** The Stereo-PIV system and its location on the rig

The Stereo PIV measurements were performed with the cameras in a forward-forward scattering Willert (1997) configuration. The angle between each camera and the laser sheet was approximately  $33^\circ$  (fig. 8.2.6 and 8.2.7a).

The calibration of the Stereo set-up was performed before and after each experiment (fig. 8.2.7).

The magnification of the images is 0.140 mm/pixel in the centre of the image. The time between laser pulses,  $\Delta t$ , ranged from  $1.3 \cdot 10^{-6}$  s to  $2.6 \cdot 10^{-6}$  s.



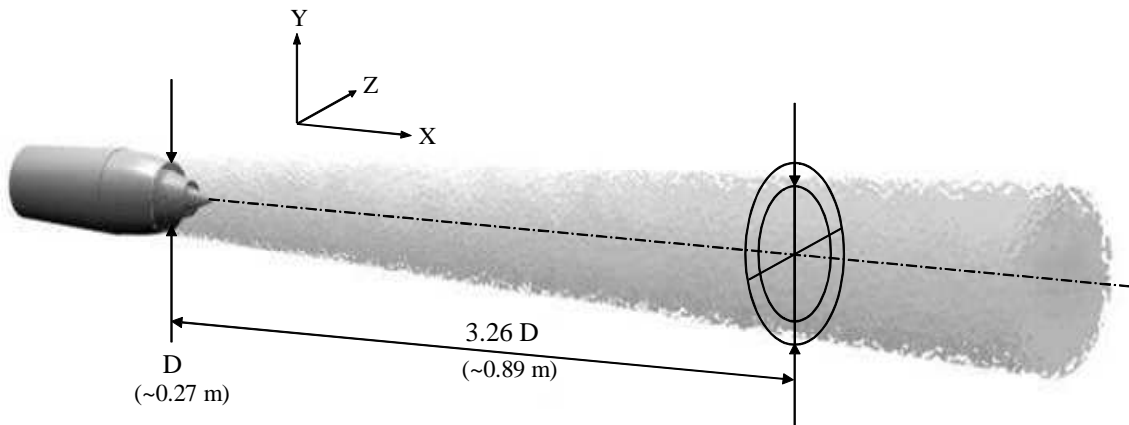


**Figure. 8.2.7:** a) The Stereo forward- forward scattering Willert (1997) configuration b) The 3D calibration

The results of the measurements in this configuration are reported in section 8.3.1.

### 8.2.2 Cross cuts experimental set-up: short cowl vs. serrated nozzle

A second case of application of the Stereo-LFC PIV combination within CoJeN project corresponds to the measurement of cross plane cuts (fig. 8.2.8). The results presented in section 8.3.2 are relative to the cross cut at 3.26 diameters from the nozzle.



**Figure 8.2.8:** Cross cut

In this case, short cowl nozzles (fig. 8.2.9) corresponding to the geometry of the Trent 900 engine were analyzed comparing usual lips with serrated ones. Details on the nozzle geometry are not given due to project confidentiality. The interest in this kind of comparisons is the ability of the nozzle to mix the hot jet with the coaxial one and with the surrounding air.

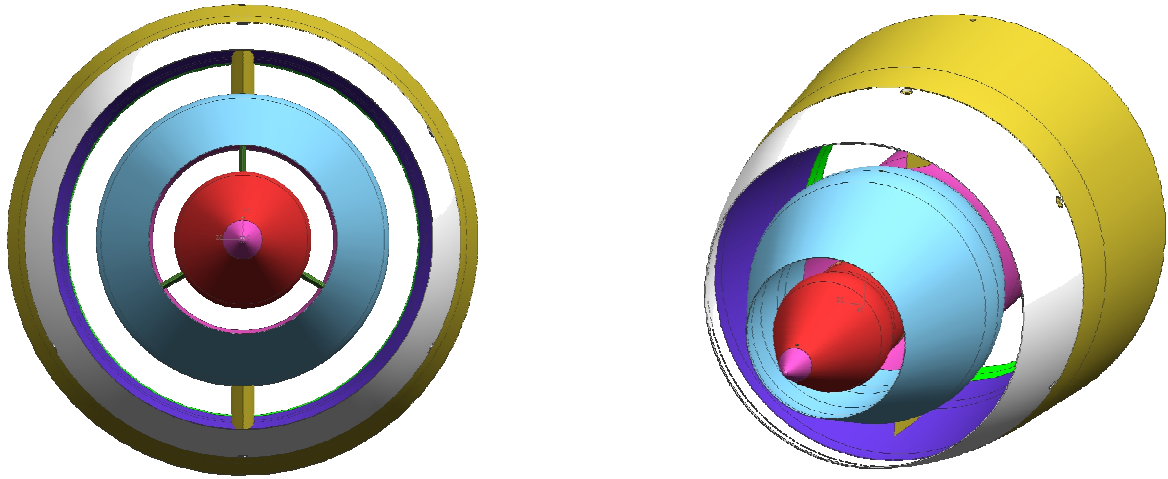


Figure 8.2.9: The short cowl nozzle

In this case, the core flow corresponds to an outlet velocity of 480 m/s and a static temperature of 560° C, the bypass had a velocity of 303 m/s and a static temperature of 53° C, all of them constant over time.

For these measurements and due to the different location of the Stereo-PIV system in respect to the rig, the Stereo configuration was a Willert configuration with one camera on each side of the laser sheet (fig 8.2.10 b-top). It was not a forward-forward scattering configuration as the camera were not pointing against the laser direction. Images during the 3D calibration of this setup are shown in figure 8.2.10a and 8.2.10b (bottom). In this configuration, the laser sheet is configured vertically departing from the bottom part of the set-up.

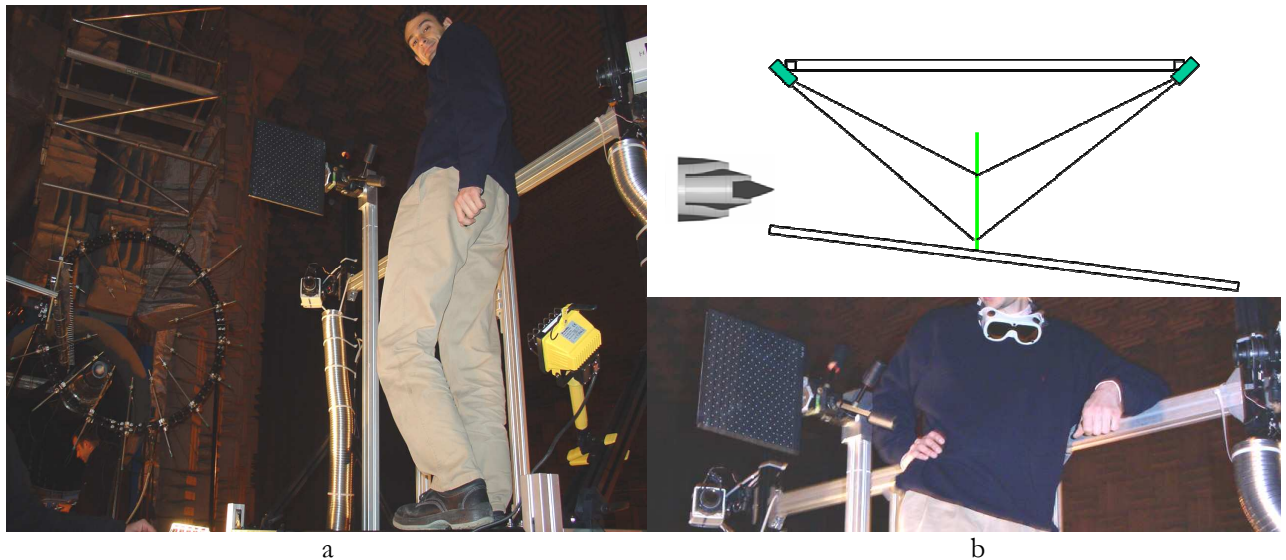
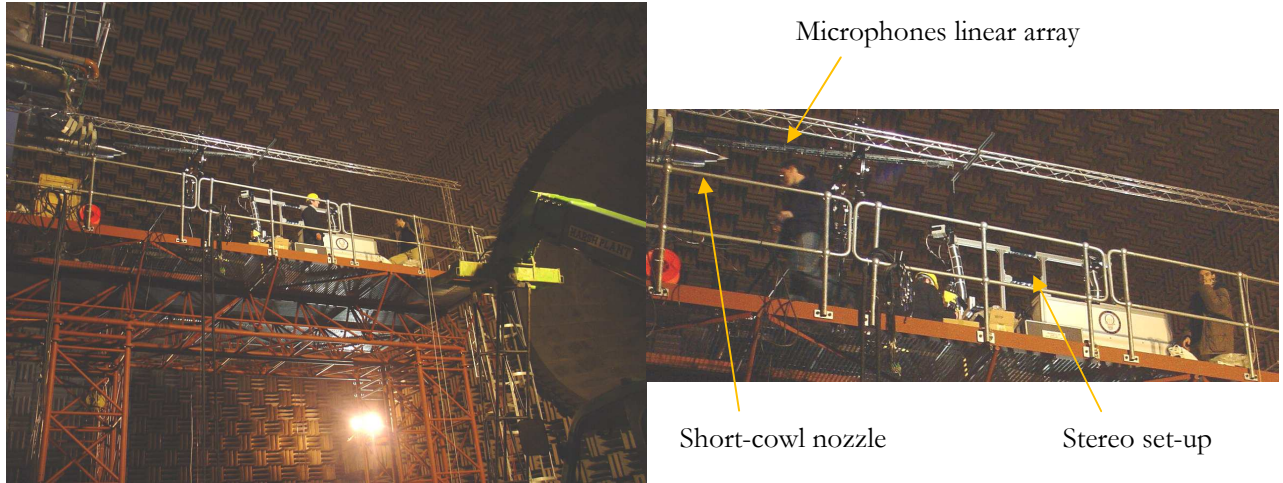


Figure. 8.2.10: a) Cross cut calibration b) Top view of the cross cuts stereo set-up and location of the microphone array (top). Cross cut calibration-particular (bottom)

The experimental set-up was conditioned by the presence of a linear array of microphones, used in the contemporary acoustic measurement campaign of other partners of the European project, as can be seen in figure 8.2.11. This affected the quality of the images in the left hand side (as can be observed in the measurements of section 8.3.2). In addition, it forced to locate one of the cameras downstream of the flow, receiving laterally part of the influence of the jet. The optics of this camera had to be glued to avoid change in the settings due to friction with the flow.



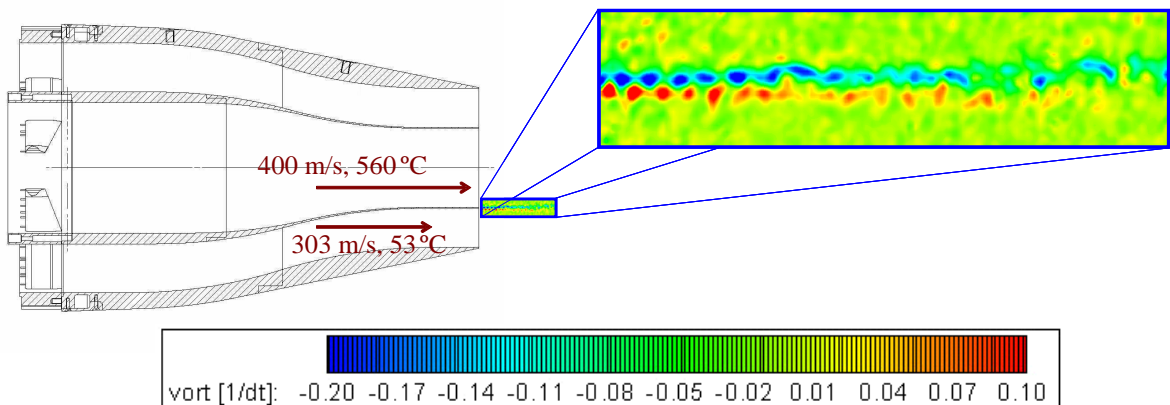
**Figure 8.2.11:** The cross cuts stereo set-up and location on the rig with respect to the nozzle (zoomed and described on the right hand side). The measurements for different positions were done by traversing the whole set up along the axial direction.

### 8.3. Experimental results

This section reports on the results obtained when applying the Stereo-LFC PIV to the jet nozzles and configurations described in the previous section at a semi industrial scale. Comparisons with the Stereo-Multigrid enhanced with image distortion are included. Subsection 8.3.1 focuses on the measurements performed on the coplanar nozzle depicted in figure 8.2.2. Subsection 8.3.2 show the experimental results of cross cuts obtained as described in subsection 8.2.2 on the short cowl nozzles.

#### 8.3.1. Vortex street experimental results in the coplanar nozzle

This section offers some of the measurements obtained for the study of the vortex street detected in the coplanar nozzle (figure 8.3.1). Further details can be found in Nogueira et al 2007.



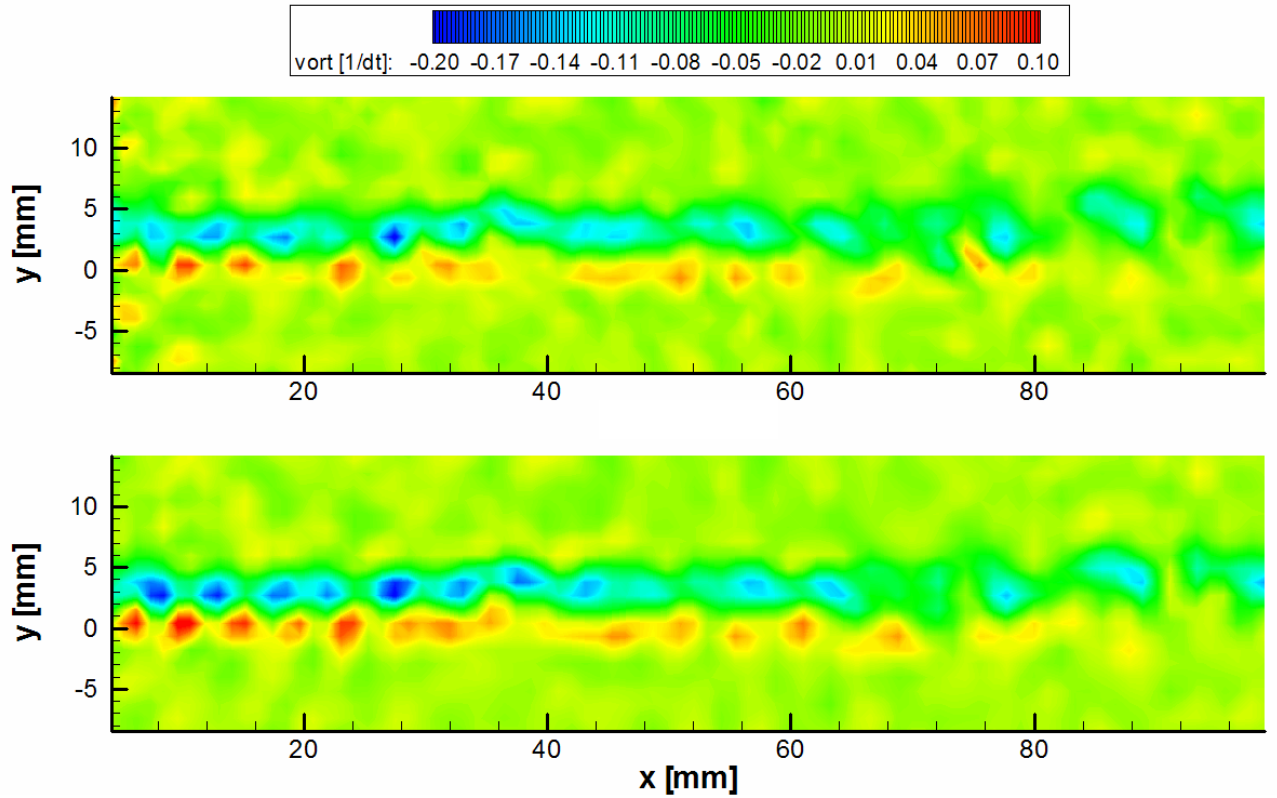
**Figure 8.3.1** Measurement location of the vortex street in respect to the nozzle and zoom of a snapshot of the vorticity.



Two different flow magnitudes are presented, that allow checking the coherence between the results of real images and the synthetic ones:

1. The vorticity map obtained from a single snapshot of the flow
2. The turbulent kinetic energy (*TKE*) map obtained from 700 snapshots of the flow.

For the first case, figures 8.3.2 and 8.3.3 show the results when measuring the same experimental PIV image with several set-ups for Stereo-LFC PIV and Stereo Multigrid enhanced with image distortion.



**Figure 8.3.2:** Comparison of the performance in terms of vorticity maps. Stereo-Multigrid enhanced with image distortion with a grid distance of 8 pixels:  $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$  (upper plot). Stereo-LFC PIV with a grid distance of 8 pixels (lower plot).

Surprisingly, PIV images were good enough to be evaluated with  $W_s = 16$  pixels with the Multigrid software (fig. 8.3.2), even though they correspond to images obtained in a semi-industrial environment.

Results when processing with  $W_s = 8$  pixels present small scale features, coherent with a high spatial frequency noise generated in the measurement (fig. 8.3.3).

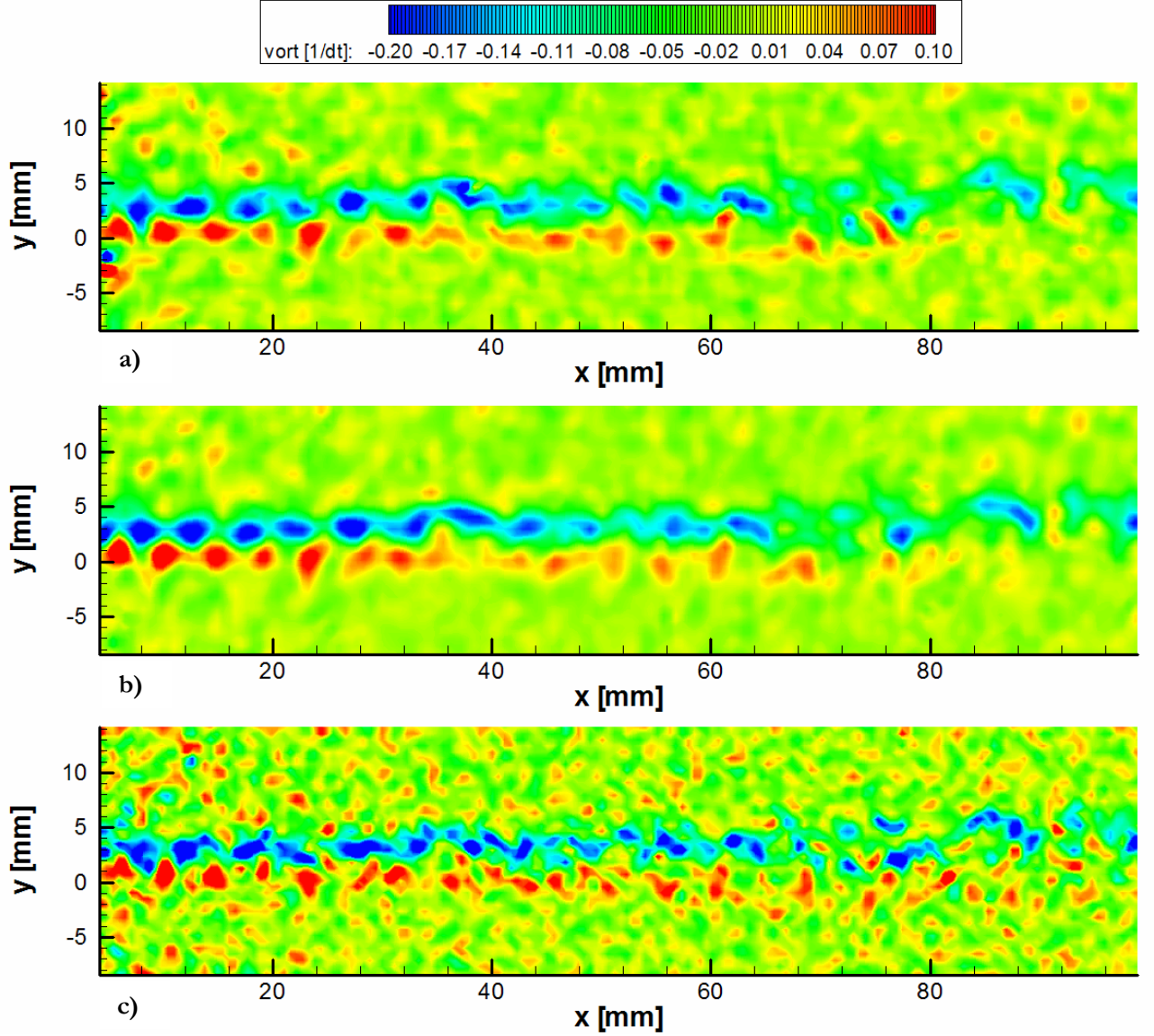
The results of the Stereo-Multigrid enhanced with image distortion  $W_s = 16$  pixels and 75% overlapping and for  $W_s = 8$  pixels and 50% overlapping are depicted in figure 8.3.3 a and c. It can be notice that the noise in the second case increases up to a situation where the measurement is not reliable, fixing a limit in the smallest dimension for the interrogation window for this algorithm.

The case that shows large values for the vorticity in the vortex street together with smaller appearance of high spatial frequency features outside of them corresponds to the Stereo-LFC PIV with 4 pixels between vectors (fig.8.3.3b). This is coherent with a high spatial resolution combined with robustness.

Globally the flow field corresponds to displacements in the order of 9 pixels for the upper half of the image (core flow) with variations of 1 pixel and displacements in the order of 7 pixels with

variations of 1 pixel in the lower half (bypass flow).

This uniformity means an easy task for validation algorithms. The consequence is that the differences on the measurements can be attributed mainly to the PIV algorithm and not to inter-iteration validations



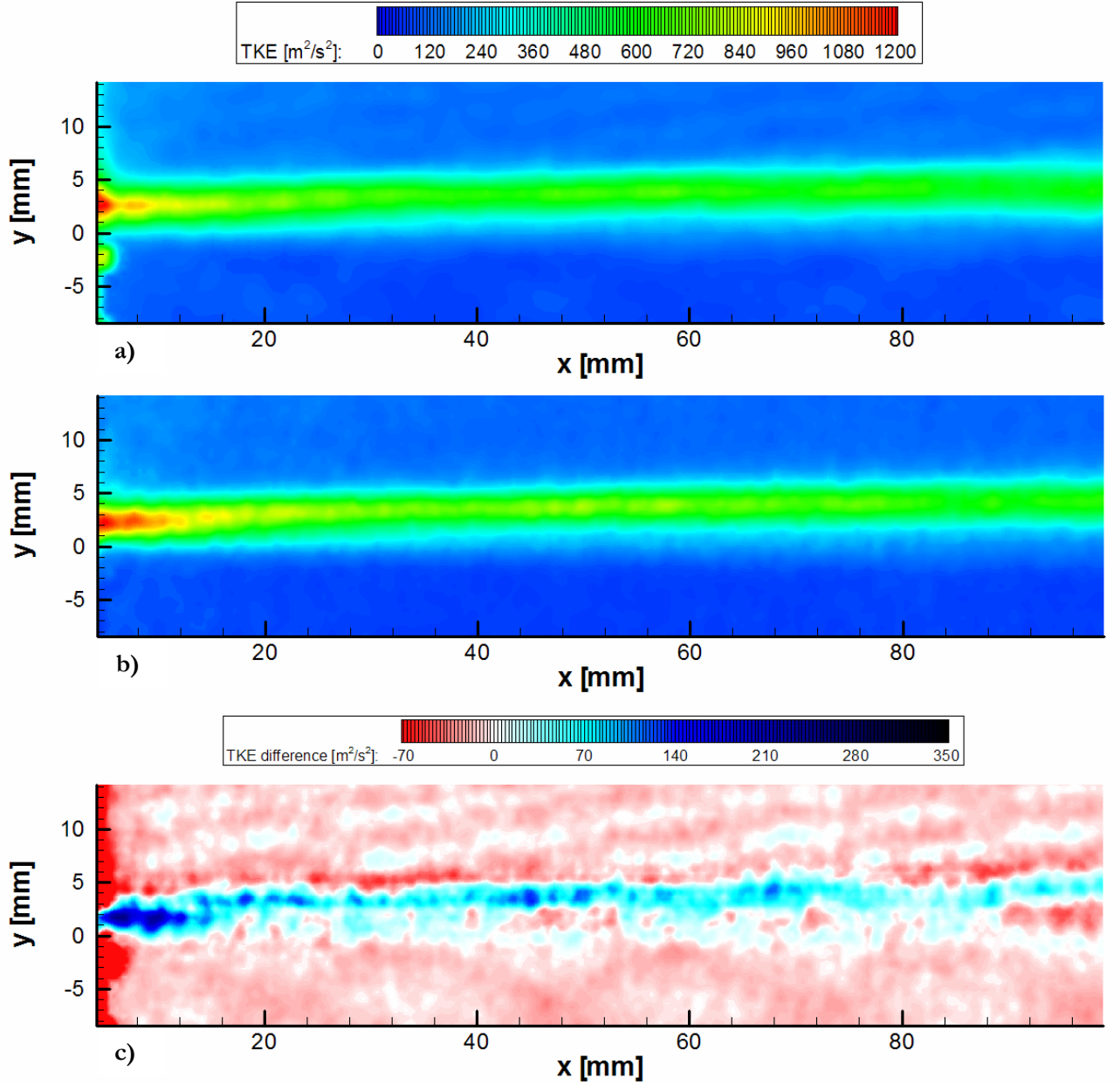
**Figure 8.3.3:** Comparison of the performance in terms of vorticity maps. **a)** Stereo-Multigrid enhanced with image distortion with a grid distance of 4 pixels:  $W_s = 16$  pixels,  $\sigma_v = 75\%$ . **b)** Stereo-LFC PIV with a grid distance of 4 pixels **c)** Stereo-Multigrid enhanced with image distortion with a grid distance of 4 pixels:  $W_s = 8$  pixels,  $\sigma_v = 50\%$ .

The results for the statistics on turbulent kinetic energy are presented in figures 8.3.4 and 8.3.5.

For the three cases presented, the *TKE* was calculated neglecting vectors more than 3 standard deviations away from the local average value. This reduces the incidence of occasional outliers and allows for a better comparison of the PIV algorithm, thus reducing the possible influence of validation algorithms on the differences between the measurements.

The uncertainty of the measurements, excluding bias errors, has been estimated to be  $\sim 86 \text{ m}^2/\text{s}^2$  for the zone of maximum *TKE* and  $\sim 12 \text{ m}^2/\text{s}^2$  for the floor of this magnitude.



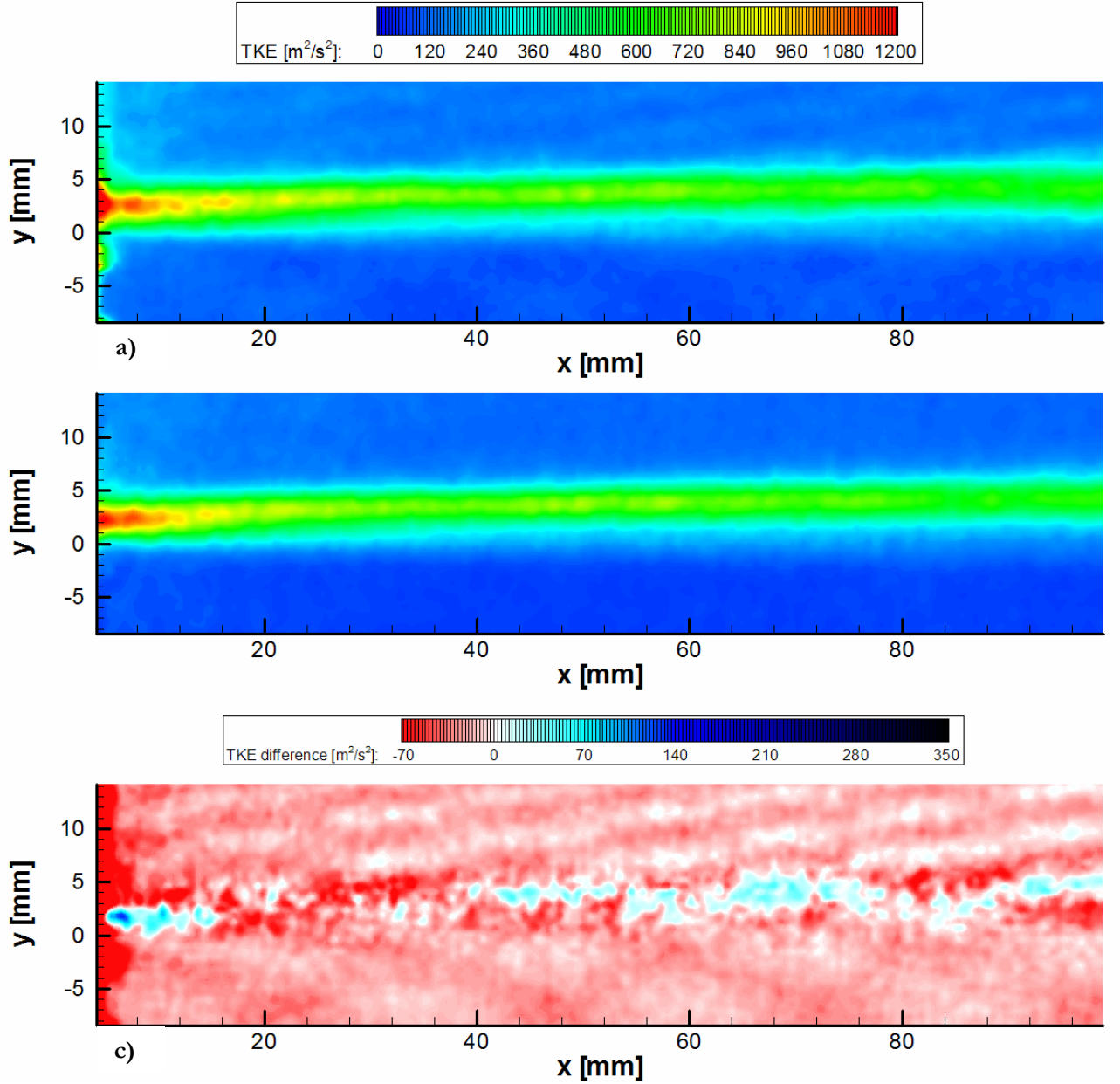


**Figure 8.3.4:** Comparison of the performance in terms of  $TKE$ . **a)** Stereo-Multigrid enhanced with image distortion with a grid distance of 8 pixels:  $W_s = 16$  pixels,  $ov = 50\%$ . **b)** Stereo-LFC PIV with a grid distance of 4 pixels **c)** Difference between the previous two cases.

The difference by subtracting the  $TKE$  obtained by Stereo-Multigrid enhanced with image distortion with  $W_s = 16$  pixels and  $ov = 50\%$  (fig.8.3.4a) to the one obtained by Stereo LFC-PIV with 4 pixels grid distance (fig.8.3.4b) is depicted in figure 8.3.4c. It is positive along the line of maximum  $TKE$  at the vortex street. The mean value of this difference is  $71 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . On the contrary, the result is mainly negative in the floor of the  $TKE$ , corresponding to the zone outside of the vortex street. The mean value for this difference is in the order of  $-10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . These results are coherent with a lower error, together with a better resolution of the vortex street for Stereo-LFC PIV.

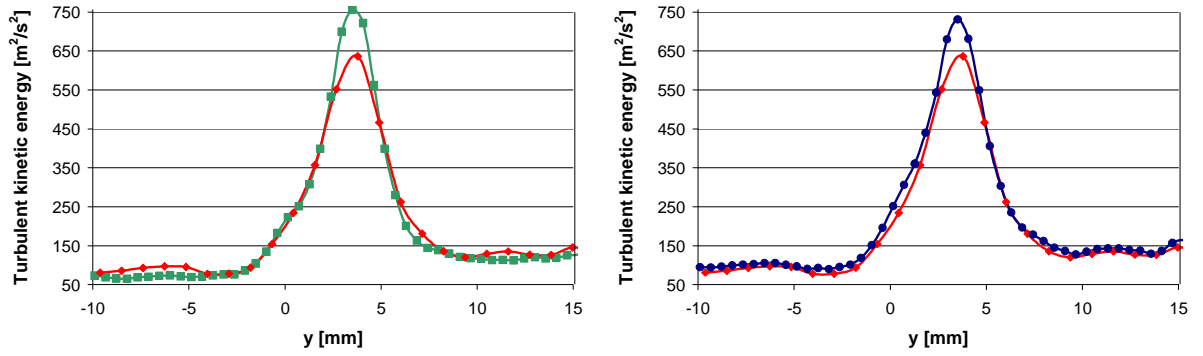
The same operation for the case of  $W_s = 16$  pixels and  $ov = 75\%$ , depicted in figure 8.3.5c, gives a mean value of the difference along the line of maximum  $TKE$  at the vortex street in the order of  $-2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , while it corresponds to approximately  $-20 \text{ m}^2/\text{s}^2$  for the  $TKE$  floor. This result is coherent with a lower error in the zone corresponding to the  $TKE$  floor and a similar average for the maximum  $TKE$  zone for Stereo-LFC PIV. This might indicate a similar resolution for the flow

scales containing relevant  $TKE$ , with larger noise for the Multigrid approach. In this sense, figure 8.3.5c would be an approximation of the measurement error for the Multigrid system.



**Figure 8.3.5:** Comparison of the performance in terms of  $TKE$ . **a)** Stereo-Multigrid enhanced with image distortion with a grid distance of 4 pixels:  $W_S = 16$  pixels,  $\sigma = 75\%$ . **b)** Stereo-LFC PIV with a grid distance of 4 pixels **c)** Difference between the previous two cases.

Perpendicular cuts of  $TKE$  at the location  $x = 45$  mm are presented in figure 8.3.6. Although the differences may not seem large, their consistency is relevant. It has to be taken into account that for a perturbation of a certain scale the  $TKE$  increment is proportional to its size. The small scale noise does not have a large effect on the  $TKE$  unless it is persistent along the flow field, like in the case presented in figure 8.3.3c.



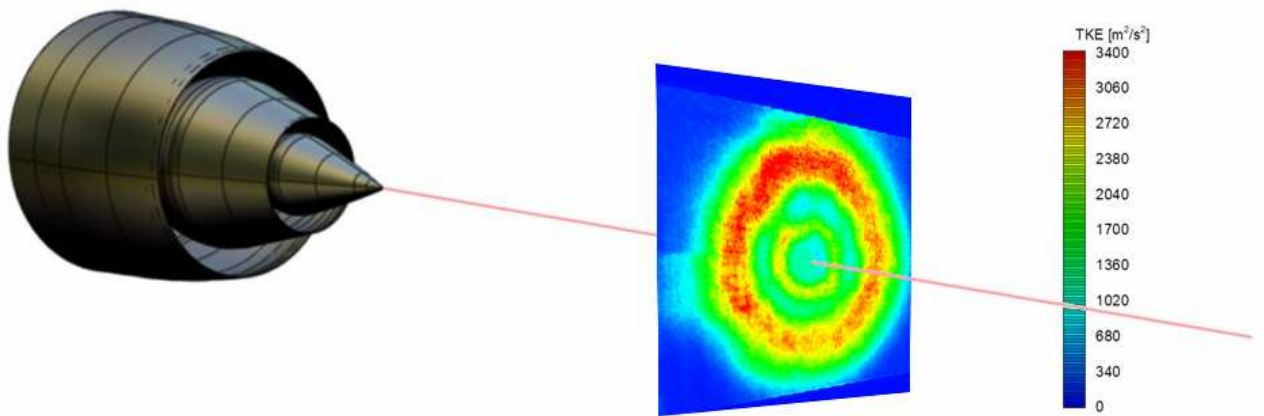
**Figure 8.3.6:** Profiles of the turbulent kinetic energy  $TKE$  at  $x = 45$  mm. Comparison of Stereo-LFC (*green squares*) measurement, Stereo-Multigrid with image distortion with  $Ws = 16$  pixels,  $ov = 50\%$  (*red diamonds*) and Stereo-Multigrid with image distortion with  $Ws = 16$  pixels,  $ov = 75\%$  (*blue circles*).

With the Multigrid implementation and for a given window size, it is worth to consider what is the effect of shifting from 50% to 75% overlapping. For both cases,  $TKE$  and vorticity calculations, the larger number of vectors reduces the effect of the 3 by 3 vectors smoothing. This is helpful in terms of frequency response, but has also the negative effect of reducing the dumping of noise between iterations. In addition, although the frequency respect to the flow field improves, the one for the correction of spurious errors introduced in pervious iterations worsens (see figures 6.4.3 and 6.4.4 in chapter 6). The results obtained are coherent with this reasoning, showing better resolution but probable presence of larger noise in the measurement.

The Stereo-LFC PIV results also indicate that vortices down to a size comparable to the laser sheet thickness can be measured in a stereo configuration when their axes are perpendicular to the laser sheet.

### 8.3.2 Cross cuts experimental results: short cowl vs. serrated nozzle

As commented in section 8.2.2, the second case of interest corresponds to the evaluation of differences between a usual short cowl nozzle and a modified version by introducing a serrated geometry for the outer lip. Figure 8.3.7 indicates the location of the measurement in relation to the nozzle.



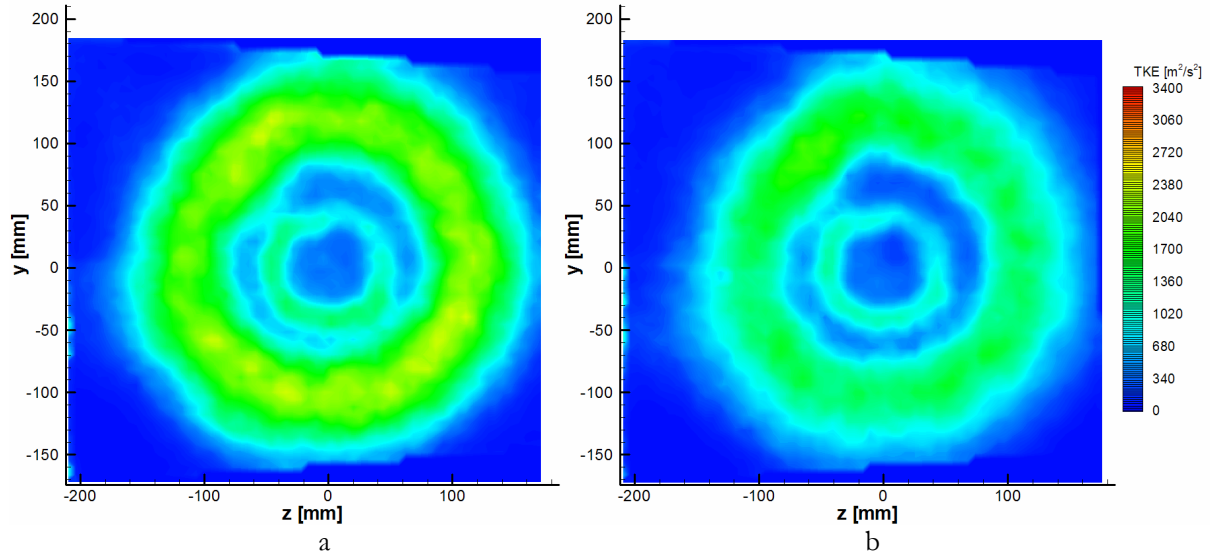
**Figure 8.3.7:** Visualization of the location of the measurement relative to the nozzle.

The turbulent kinetic energy ( $TKE$ ) map obtained from 300 snapshots of the flow is used for the comparisons presented in this section and to check coherence with the results of chapter 7.

As done in the previous section the  $TKE$  was calculated neglecting vectors more than 3 standard

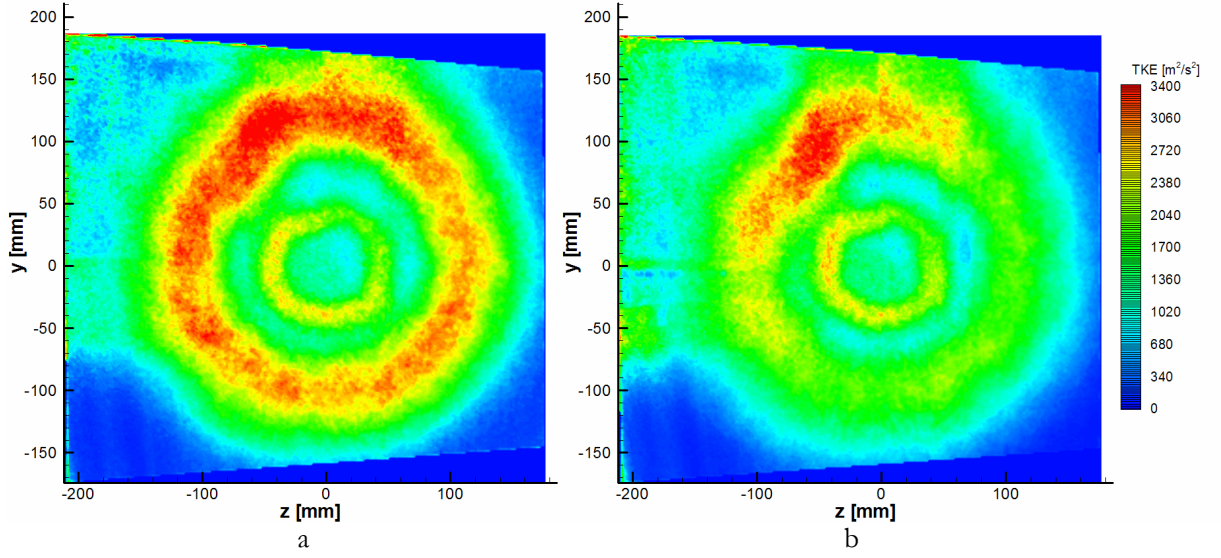
deviations away from the local average value. It should be noticed that the cross cuts are difficult realizations due to the large out of plane velocity (in the order of 500 m/s) in comparison with the in-plane velocities (in the order of 50 m/s).

The measurements obtained with Stereo-Multigrid enhanced with image distortion indicate presence of strong noise sources. Tuning the size of the interrogation window and the overlapping, acceptable measurements were obtained for  $Ws = 64$ ,  $ov = 50\%$  figure 8.3.8. With this setting, the turbulent kinetic energy displayed corresponds to flow features larger than  $\sim 13$  mm.



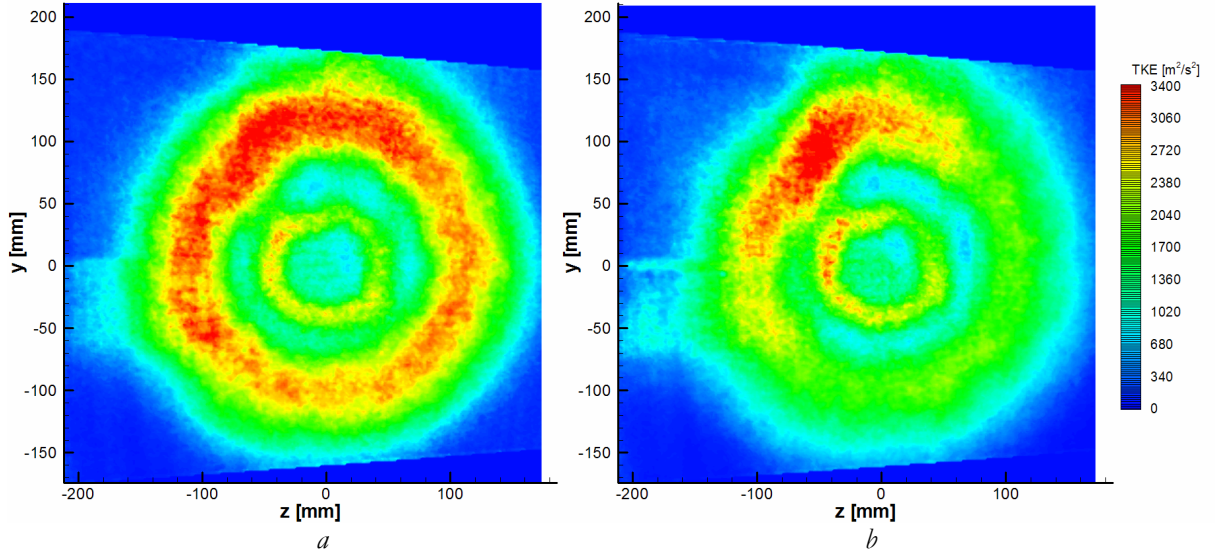
**Figure 8.3.8:** Turbulent kinetic energy plots for Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion with  $Ws = 64$  pixels and  $ov = 50\%$ . Cross cut at  $\sim 3.3$  diameters downstream of the nozzle. **a)** Conventional short cowl nozzle. **b)** Serrated nozzle.

The plots indicate certain asymmetries that are shared by both nozzles. Previous measurements in the scientific literature done at other wind tunnels (Birch 2005) indicate that very small misalignments produce large asymmetries. The consistence in the asymmetry of the upper right side indicates that the facility and mounting protocol is adequate for the comparison of both nozzles. It can be observed a significantly lower value in the TKE for the serrated case. If this is due to energy contain in smaller structures or to the fact that more mixing has already taken place before this location at  $x = 3.26 \cdot D$  can be further analyzed if smaller scales are measurable. When trying to solve smaller structures, the error increases. An example of the results obtained by the Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion with  $Ws = 16$  pixels,  $ov = 50\%$  is shown in figure 8.3.9. It can be notices how the  $TKE$  increases with respect to the lower resolution case, in regions were no large  $TKE$  is expected.



**Figure 8.3.9:** Turbulent kinetic energy plots for Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion with  $W_s = 16$  pixels and  $\sigma = 50\%$ . Cross cut at  $\sim 3.3$  diameters downstream of the nozzle. **a)** Conventional short cowl nozzle. **b)** Serrated nozzle.

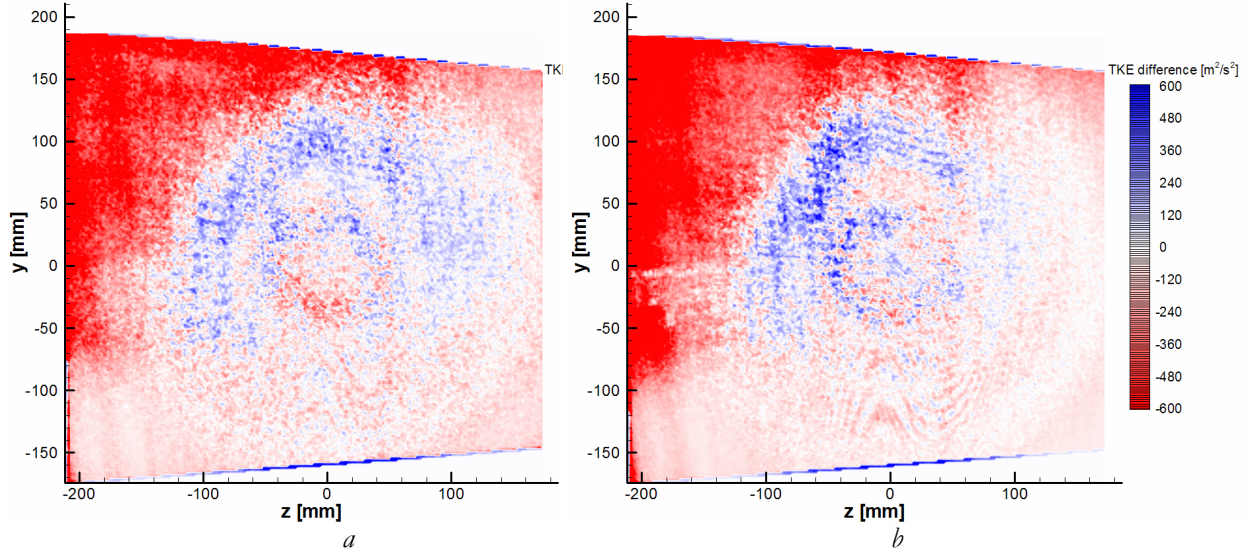
The same zone analyzed after realizations done with Stereo-LFC PIV show smaller error giving acceptable results for this scale as it is shown in figure 8.3.10. Only at the left zone, corresponding to the microphone array described in section 8.2.2, it shows remarkable errors. This raises the resolution limit of the flow features to  $\sim 3$  mm.



**Figure 8.3.10:** Turbulent kinetic energy plots for Stereo-LFC PIV with  $W_s = 16$  pixels,  $\sigma = 50\%$ . Cross cut at  $\sim 3.3$  diameters downstream of the nozzle. **a)** Conventional short cowl nozzle. **b)** Serrated nozzle.

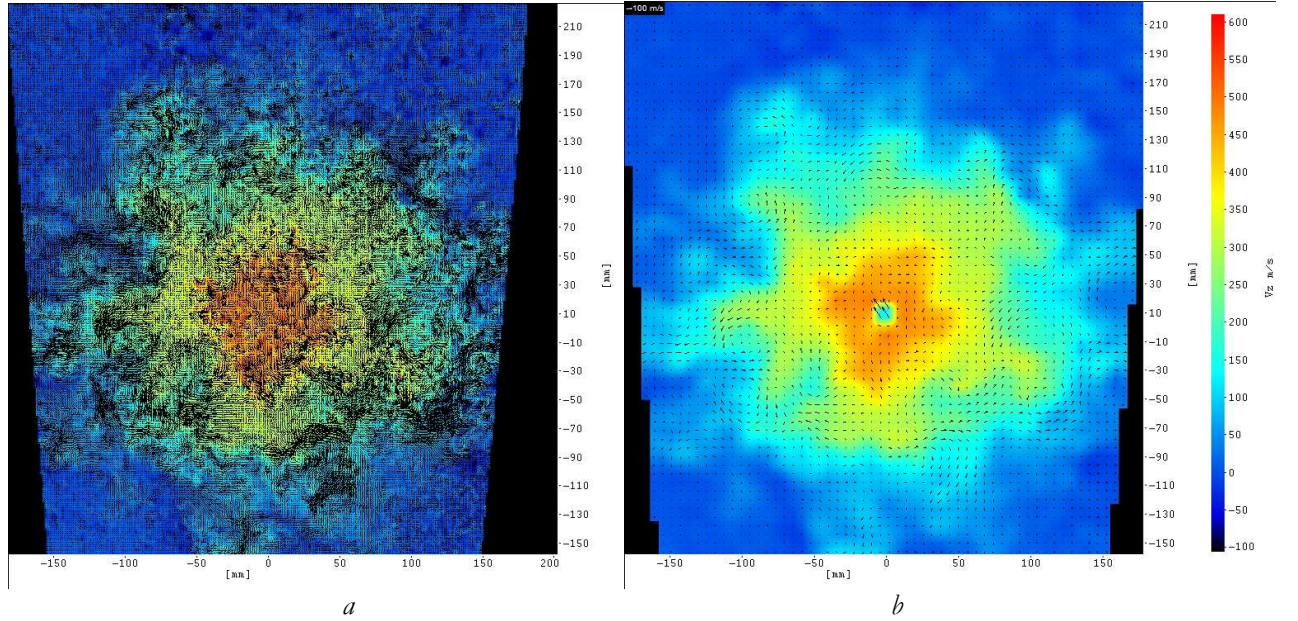
The difference between the  $TKE$  obtained by the Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion (fig. 8.3.9) and the one obtained by the Stereo-LFC PIV (fig. 8.3.10) is depicted in figure 8.3.11. It shows larger values for the signal and smaller for the background. This is coherent with a better description of the flow in the case for Stereo-LFC PIV.





**Figure 8.3.11:** Difference between the turbulent kinetic energy plotted in figures 8.3.9 and 8.3.10  
**a)** Conventional short cowl nozzle. **b)** Serrated nozzle.

To give a visual idea of the difference in the scales analyzed between image 8.3.8a (Stereo-Multigrid with  $W_s = 64$  pixels and  $ov = 50\%$ ) and 8.3.10a (Stereo-LFC with 8 pixels grid distance), the axial velocities that correspond to a single snapshot from those images are presented in figure 8.3.10.



**Figure 8.3.10:** Comparison of the performance in terms of axial velocity maps. Cross cut at  $\sim 3.3$  diameters downstream of the nozzle. **a)** Stereo-LFC PIV with grid distance of 8 pixels. **b)** Stereo-Multigrid enhanced with image distortion with  $W_s = 64$  pixels and  $ov = 50\%$ .

## 9. CONCLUSIONS

### 9.1 System Developed

This PhD Thesis offers the development and first implementation of LFC PIV in a Stereo setup.

Its performance is tested by means of synthetic PIV images for different sizes of in-plane vortices, different kinds of out of plane displacement and different random location of the particles. This assessment is done comparing the Stereo-LFC PIV with Stereo-Multigrid PIV enhanced with image distortion and with conventional PIV when possible. The results indicate the following issues:

- Generally, in the measurable cases (for peak vorticities up to  $\sim 1.5 \Delta t^{-1}$  and out of plane displacements up to 50% of the laser sheet width) the variability of the measurement due to the random location of the particles is significantly smaller for Stereo-LFC PIV than for the compared algorithms.
- For both large and small scales, the results show an improved ability to cope with large gradients. Valid measurements have been achieved for peak vorticities as large as  $\sim 1.5 \Delta t^{-1}$ . This corresponds to a rotation of  $\sim 43^\circ$ ; which is  $\sim 25$  times the maximum vorticity prescribed by Kean and Adrian (1993) for a conventional correlation PIV. This enlarged vorticity dynamic range allows an increase in  $\Delta t$ , thus widening also the velocity measurement dynamic range for a certain subpixel resolution.
- For the particular case of small scales, the results indicate additional benefits of the Stereo-LFC PIV with respect to Multigrid-Stereo PIV enhanced with image distortion. For vortices of radius  $\sim 28$  pixels, the mean errors of the developed Stereo-LFC PIV are in the order of half of the error of the multigrid approach for 32 pixel size interrogation windows. Errors below 20% have been achieved for peak vorticities as large as  $1.8 \Delta t^{-1}$  and out-of-plane loss of particles of 75%. For smaller interrogation windows in the multigrid approach, the differences are smaller for peak vorticities  $< 0.9 \Delta t^{-1}$  but still significant. In addition, it has to be taken in to account that the successful application of such small windows in real images is restricted to high quality acquisition that is not always possible.

The study shows that in-plane vortices (i.e. presenting axis perpendicular to the laser sheet) with sizes down to the order of the laser sheet thickness are measurable in stereo configurations.

The application of the system to the analysis of real images is performed for both laboratory set-ups and industrial scale ones. The conclusions on these experiments are the following:

- The results show coherence with the theoretical approach in respect to robustness, velocity gradients and spatial resolution.
- In particular, results on spatial resolution indicate that performance for Stereo-LFC is better than that of the Stereo-Multigrid. This is so despite the fact that the good quality of some of the experimental images allowed analyzing them with  $W_s = 16$  pixels in the Multigrid implementation. Except for the last iteration, in this approach the processing with small windows is helped by the fact that there is a 3 by 3 vector smoothing between iterations. Further reduction to  $W_s = 8$  pixels has been found not to be suitable for these real images.

## 9.2 Additional contributions

Although not directly linked to the combination developed, the fulfillment of this PhD Thesis includes the following contributions:

- Along the measurement performed on the 2D2C PIV systems for familiarization with advanced algorithms, the ones over fluidized bed remarked the higher accuracy and robustness of the Local Field Correction PIV, especially in areas with scarce seeding in presence of high velocity gradients. This highlighted some of the aspects to consider during the study of performance of the Stereo-LFC PIV combination. The seeding of the experiment together with the illumination system made the measurement quite difficult. The good results obtained by the LFC remarked its minor sensitivity to the seeding quality. This work was published in the journal Powder Technology (“Initial particle velocity spatial distribution from 2-D erupting bubbles in fluidized beds”, D. Santana., S. Nauri, A. Acosta, N. García and A. Macías-Machín; 2005, Vol. 150, pp. 1-8).
- A methodology that discriminates between frequency response in relation to the flow field to measure and the spurious errors introduced between iterations is proposed for theoretical qualitative predictions. Results are coherent with the evaluations on synthetic images.
- A synthetic image generator for stereo couples of PIV images has been created.
- To evaluate performances over synthetic images, programs for the discrimination of integration time error and algorithm error have been created. This allows a more accurate assessment about the measuring difficulties of a certain algorithm. It also indicates the magnitude of the integration time for the selected flow fields.
- When trying to modify the software of LFC for the development of the combination with Stereo systems, an infinite loop was found to appear randomly for about one out of 20 images. Along the operations performed to identify and solve this problem, some bugs within the original algorithms have been located and solved improving the original software to allow proper serial processing.
- Many of the contents in this Thesis have been published by the author in two PIV symposiums (Lisbon 2006 and PIV'07). The paper from the last symposium has been selected by the journal Experiments in fluids to be considered for publication in the special issue on PIV. It was submitted as follows “Limits and accuracy of the Stereo-LFC PIV Technique and its application to flows of industrial interest” Nauri S, Nogueira J, Lecuona A, Legrand M, Rodríguez PA,(2007).



### 9.3 Future work

The Stereo-LFC PIV combination has shown good results and suitability for measurements at industrial scale. The tools developed to analyze its performance have shown interesting details. Further studies in these directions open paths for future research. Among the future lines of research some are already under way and are summarized below:

- Among the differences between the two advanced algorithms tested in this Thesis, it would be interesting to discriminate the main reason for the difference on performance. In order to do this, the weighting function used in the Stereo-LFC algorithms could be implemented directly inside the commercial software. With this purpose contacts with the programmers of La Vision has already been taken.
- The theoretical qualitative prediction proposed discriminating two different concepts in the signal (flow to measure and spurious error introduced in previous iterations) can be analyzed in detail to asses its correspondence to actual measurements on synthetic images.
- The size of the smallest vortex that can be measured in a stereo configuration may depend on the profile of the laser sheet light along its width. It can be of interest to define this dependence by measurements of synthetic images with different light profiles for the laser.
- The influence of the angle of the stereo configuration in this resolution limit is also a subject for study. It is relevant as it would describe a trade off between accuracy in the measurement of the out of plane component and spatial resolution.
- It is interesting to study the influence of differences in illumination between one laser pulse and the other of each particle image couple (Nobach and Bodenschatz 2007). This can be studied for the system developed with the use of the synthetic image generator.

## 9.4 Publications

The research developed during this Thesis resulted in one publication in a SCI journal, three in conferences and one book chapter as listed below:

Santana D, Nauri S, Acosta A, García N, Macías-Machín A (2005) “*Initial particle velocity spatial distribution from 2-D erupting bubbles in fluidized beds*” Powder Technology, Vol. 150, pp 1-8 (ISSN 0032-5910)

Nogueira J, Legrand M, Nauri S, Rodríguez PA, Lecuona A (2006) “*Analysis of the vortex street generated at the core bypass lip of a jet engine nozzle*” Proceedings of the PIVNET2 WP6 Workshop on Particle Image Velocimetry

Nauri S, Legrand M, Lecuona A, Rodríguez PA, Nogueira J (2006) “*Combination of advanced 2D PIV and Stereo Technique*”. 13th Int. Symp. on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal

Nauri S, Nogueira J, Lecuona A, Legrand M, Rodríguez PA (2007) “*Limits and accuracy of the Stereo-LFC PIV Technique*”. 7th Int. Symp on Particle Image Velocimetry, Rome, Italy

Nogueira J, Legrand M, Nauri S, Rodríguez PA, Lecuona A (2008) “*Analysis of the vortex street generated at the core bypass lip of a jet engine nozzle*” In the book: Particle Image Velocimetry-New Development and Recent Applications. Ed Springer (ISBN – 978-3-540-73527-4)

Additionally, another publication SCI journal and three in a conference are being considered for acceptance:

Nauri S, Nogueira J, Lecuona A, Legrand M, Rodríguez PA (2008) “*Limits and accuracy of the Stereo-LFC PIV Technique and its application to flows of industrial interest*” Exp Fluids – Special Issue: submitted

Nauri S, Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez PA, Legrand M (2008) “*Study on the limits of resolvable scales in Stereo PIV*” 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics: submitted

Nogueira J, Nauri S, Legrand M, Lecuona A, Rodríguez PA (2008) “*Assessment and correction of some camera errors in PIV*” 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics: submitted

Legrand M, Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez PA, Nauri S (2008) “*Stereo-PIV atmospheric Low Swirl Burner flow characterization*” 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics: submitted

## BIBLIOGRAPHY

**Altenhofen RE (1952)**

*“Rectification”*

In: Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry, Washington, DC, p 457

**Adrian RJ (1991)**

*“Particle-image techniques for experimental fluid mechanics”*

Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp 261-304

**Adrian RJ (1984)**

*“Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow; speckle velocimetry vs particle image velocimetry”*

Appl. Optics, 1984, Vol. 23(11), pp 1690-1691.

**Adrian RJ, Soloff EM, Liu ZC, Meinhart CD, Lai W (1997)**

*“Stereoscopic PIV Applications to the Study of Turbulence”*

Congreso Internacional PIV’97-Fukui, Fukui, Japón. Julio 1997

**Arroyo MP, Greated CA (1991)**

*“Stereoscopic particle image velocimetry”*

Meas. Sci. Technol., Vol. 2, pp 1181-1186.

**Astarita T (2007)**

*“Analysis of weighting windows for image deformation methods in PIV”*

Exp. Fluids, Vol. 43, pp 859-872

**Astarita T, Cardone G (2005)**

*“Analysis of interpolation schemes for image deformation methods in PIV”*

Exp. Fluids, Vol. 38, pp 233-243

**Bendat JS, Piersol AG (1980)**

*“Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis”*,

Wiley-Interscience, New York

**Bendat JS, Piersol AG (1971)**

*“Random Data: Analysis and Measurement Procedures”*

Wiley-Interscience, New York

**Birch SF (2005)**

*“An Experimental Study of Flow Asymmetry in Co-axial Jets”*

11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference) 23 - 25 May 2005, Monterey, California

**Bjorkquist DC (1998)**

*“Design and Calibration of a Stereoscopic PIV System”*

Proc. 9th Int. Symp. on Applic. of Laser Tech. to Fluid Mechanics. Vol. 1, pp 6.5.1-6.5.8, Lisbon, Portugal

**Bracewell R (1978)**

*“The Fourier Transform and its Applications, second edition”*,

McGraw-Hill

**Bridges J (2002)**

*“Measurements of Turbulent Flow Field in Separate Flow Nozzles With Enhanced Mixing Devices—Test Report”*

NASA/TM—2002-211366

**Couch LW (2001)**

*“Digital and Analog Communications Systems”*

Sixth Edition, Prentice Hall, New Jersey, pp. 406-409

**Fincham AM, Spedding GR (1997)**

*“Low-cost, high resolution DPIV for measurement in turbulent fluid flows”*

Exp. Fluids, Vol. 23, pp 449-462.

**Fournel T, Coudert T, Lavest JM, Collange F, Schon JP (2003)**

*“Self-calibration of telecentric lenses: application to bubbly flow using moving stereoscopic camera”*

4th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, June 2003, Charmonix (France)

**Fournel T, Coudert T (2003)**

*“Self-calibration of Stereoscopic PIV system in Scheimpflug condition”*

EUROPIV 2 Workshop on Particle Image Velocimetry, March 2003, Zaragoza (Spain) self

**Gauthier V, Riethmuller ML (1988)**

*“Application of PIDV to complex flow: measurements of the third component”*

Particle Image Displacement Velocimetry", VKI LS 1988-06 Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium

**Gouesbet, G 1996**

*“Light scattering by small particles”*

Particle Image Velocimetry, von Karman Institute for Fluid Dynamics, (VKI LS 1996-03)

**Hartley R, Sturm P (1994)**

*“Triangulation”*

ARPA Image Understanding Workshop, Monterey, Ca, Nov.1994, pp. 957-966

**Hassan YA and Canaan RE (1991)**

*“Full-field bubbly flow velocity measurements using a multiframe particle tracking technique”*

Exp Fluids, Vol. 12, pp. 49-60

**Hinsch K (1993)**

*“Particle Image Velocimetry”*

In: *“Speckle Metrology”* (ed. Sirohi R.S.), Marcel Dekker Inc., N.Y., pp 235-324

**Hinsch K D(1995)**

*“Three-dimensional particle velocimetry”*

Meas. Sci. Technol., Vol. 6, pp 742-753

**Hu H, Saga T, Kobayashi T, Taniaguchi N, Yasuki M (2001)**

*“Dual-plane stereoscopic particle image velocimetry: system set-up and its application on a lobed jet mixing flow”*

Exp Fluids, Vol. 31, pp 277-293

**Jacquot P, Rastogi P K (1981)**

*“Influence of out-of-plane. deformation and its elimination in white light speckle photography”*

Opt. Laser Eng., Vol. 2, pp 33–55

**Huang HT, Fiedler HE, Wang JJ (1993a)**

*“Limitation and improvement of PIV. Part I: limitation of conventional techniques due to deformation of particle patterns”*

Exp Fluids, Vol. 15, Springer-Verlag, pp 168-174

**Huang HT, Fiedler HE, Wang JJ (1993b)**

*“Limitation and improvement of PIV. Part II: particle image distortion, a novel technique”*

Exp Fluids Vol. 15, Springer-Verlag, pp. 263-273

**Jambunathan K, Ju XY, Dobbins BN, Ashforth-Frost S (1995)**

*“An improved cross correlation technique for particle image velocimetry”*

Meas. Sci. Technol., Vol. 6, IOP Publishing Ltd, pp 507-514

**Kähler CJ, Sammler BS, Kompenhans JK (2001)**

*“Generation and control of particle size distributions for optical velocity measurement techniques in fluid mechanics”*

4th Int. Symp. on PIV, Gottingen

**Kähler C (2000)**

*“Multiple plane stereo PIV-Recording and evaluation methods”*

EUROMECH 411, Appl. Of PIV to turbulence measurements, University of Rouen, France.

**Kähler C, Kompenhans J. (1999)**

*“Multiple plane stereo PIV- Technical realization and fluid-mechanical significance”*

3<sup>rd</sup> Int. Workshop on PIV, University of California-Santa Barbara, USA paper PIV96.

**Kean RD, Adrian RJ (1993)**

*“Theory of cross-correlation analysis of PIV images”*

Flow Visualization and Image Analysis. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp: 1-25.

**La Vision (2002)**

*“Da Vis Flow Master Software”*

PIV System Manuals for Da Vis 6.2, La Vision GmbH, Göttingen

**La Vision (2006)*****“FlowMaster70Software”***

PIV System Manuals for Da Vis 7.0, La Vision GmbH, Göttingen

**La Vision (2006)*****“FlowMaster70Hardware”***

PIV System Manuals for Da Vis 7.0, La Vision GmbH, Göttingen

**Lewis GS; Cantwell BJ; Lecuona A (1987)*****“The use of particle tracking to obtain planar velocity measurements in an unsteady laminar diffusion flame”***

Paper 87-35. The Combustion Institute, Spring Meeting (Brigham Young University, Provo, Utah)

**Lawson NJ, Wu J (1997a)*****“Three-dimensional particle image velocimetry: error analysis of digital angular stereoscopic techniques”***

Measurements Science and Technology, Vol. 8, pp 894-900

**Lecerf A, Renou B, Allano D, Boukhalfa A, Trinité M (1999)*****“Stereoscopic PIV: validation and application to an isotropic turbulent flow”***

Exp. Fluids, Vol. 26, pp 107-115

**Lecuona A, Nogueira J, Rodríguez P A, Acosta A (2004)*****“PIV Evaluation Algorithms for Industrial Applications”***

Meas. Sci. Technol. Vol.12, pp 1911-1921.

**Lecuona A, Nogueira J, Rodríguez P A, Santana DJ (2002)*****“Accuracy and time performance of different schemes of the local field correction PIV technique”***

Exp. Fluids, Vol. 33, pp 743-751

**Liu Z-C, Adrian RJ, Meinhart CD, Lai W (1997)*****“Structure of a Turbulent Boundary Layer Using a Stereoscopic, Large Format Video-PIV”***

Developments in Laser Techniques and Fluid Mechanics, Adrian RJ et al., eds., Springer, Berlin

**Lourenco LM (1996)*****“Particle Image Velocimetry: Processing techniques”***

Particle Image Velocimetry, von Karman Institute for Fluid Dynamics, (VKI LS 1996-03)

**Lourenco LM, Krothapalli K (1989)*****“Particle Image velocimetry”***

Lecture Notes in Engineering Vol. 45 "Advances in Fluid Mechanics Measurement", ed. M. Gad-el-Hak, Springer Verlag

**Nauri S, Nogueira J, Lecuona A, Legrand M, Rodríguez PA (2007)*****“Limits and accuracy of the Stereo-LFC PIV Technique and its application to flows of industrial interest”***

Exp Fluids –Special Issue: submitted

**Nauri S, Nogueira J, Lecuona A, Legrand M, Rodríguez PA (2007)**

***“Limits and accuracy of the Stereo-LFC PIV Technique”***

7th Int. Symp on Particle Image Velocimetry, Rome, Italy

**Nauri S, Legrand M, Lecuona A, Rodríguez PA, Nogueira J (2006)**

***“Combination of advanced 2D PIV and Stereo Technique”***

13th Int. Symp. on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal

**Nauri S (2002)**

***“Studio sperimentale sulle correnti di pendio”***

Tesi di laurea University “La Sapienza”, Rome, Italy

**Nobach H, Bodenschatz E (2007)**

***“Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities”***

Proc. 7th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Rome, Italy, September 11-14

**Nogueira J, Legrand M, Nauri S, Rodríguez PA, Lecuona A (2007)**

***“Analysis of the vortex street generated at the core bypass lip of a jet engine nozzle”***

Particle Image Velocimetry-New Development and Recent Applications. Ed Springer (to be published)

**Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez PA (2005a)**

***“Limits on the resolution of correlation PIV iterative methods. Fundamentals”***

Exp. Fluids, Vol. 39/2, pp 305-313

**Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez PA, Alfaro JA, Acosta A (2005b)**

***“Limits on the resolution of correlation PIV iterative methods. Practical implementation and design of weighting functions”***

Exp. Fluids, Vol. 39/2, pp 314-321

**Nogueira J, Lecuona A, Ruiz-Rivas U, Rodríguez PA (2002)**

***“Analysis and alternatives in two-dimensional Multigrid particle image velocimetry methods: application of a dedicated weighting function and symmetric direct correlation”***

Meas. Sci. Technol., Vol. 13, pp 963-974

**Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez PA (2001a)**

***“Local field correction PIV, implemented by means of simple algorithms and multigrid versions”***

Meas. Sci. Technol., Vol. 12, pp 1911-1921

**Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez PA (2001b)**

***“Identification of a new source of peak locking, analysis and its removal in conventional and super-resolution PIV techniques”***

Exp. Fluids, Vol. 30/3, pp 309-316

**Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez PA (2001)**

***“Modification of the Local Field Correction PIV technique to allow its implementation by means of simple algorithms”***

4<sup>th</sup> International Symposium on Particle Image Velocimetry, Göttingen, Germany, September 17-19

**Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez P A (1999)**

*“Local Field Correction PIV: on the increase of accuracy of digital PIV systems”*

Exp. Fluids, Vol. 27, pp 107-116

**Nogueira J, Lecuona A, Rodríguez P A (1997)**

*“Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data”*

Meas. Sci. Technol., Vol. 8/12, pp 1493-1501

**Nyquist H (1928)**

*“Certain topics in telegraph transmission theory”*

Trans. AIEE, Vol. 47, pp 617-644

**Pickering JD and Halliwell NA (1984)**

*“Speckle photography in fluid flows: signal recovery with two-steps processing”*

Appl. Optics, Vol. 23(8), pp 1128-1129

**Prasad AK, Adrian RJ (1993a)**

*“Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows”*

Exp. Fluids, Vol. 15, pp 49-60

**Prasad AK, Adrian RJ (1993b)**

*“Investigation of non-penetrative convection using stereoscopic particle image velocimetry”*

In: Cha SS; Trolinger JD (eds) Optical diagnostic in fluid and thermal flows (Proc. 2005), pp 667-682

**Prasad AK (2000)**

*“Stereoscopic particle image velocimetry”*

Exp. Fluids, Vol. 29, pp 103-116

**Prasad AK, Jensen K (1995)**

*“Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry to liquid flows”*

Appl. Optics, Vol. 34, pp 7092-7099

**QUANTEL Ltd.**

*“BrilliantB Q-Switched Nd:YAG Laser”*

Instruction Manual

**Raffel M, Willert CE, Kompenhans J (1998)**

*“Particle image velocimetry”*

Springer. Berlin/Heidelberg.

**Roth P (1971)**

*“Effective Measurements Using Digital Signal Analysis”*

IEEE Spectrum, pp. 62-70.

**Roth P (1970)**

*“Digital Fourier Analysis”*

Hewlett-Packard Journal



**Santana D, Nauri S, Acosta A, García N, Macías-Machín A (2005)**

*"Initial particle velocity spatial distribution from 2-D erupting bubbles in fluidized beds"*

Powder Technology, Vol. 150, pp 1-8

**Scarano F (2004)**

*"Super-resolution particle image velocimetry interrogation approach by means of velocity second derivatives correlation"*

Meas. Sci. Technol, Vol. 15, pp. 475-486

**Scarano F (2002)**

*"Iterative image deformation methods in PIV"*

Meas. Sci. Technol., Vol.13, R1–R19

**Scarano F, Riethmuller M L (2000)**

*"Advances in iterative multigrid PIV image processing"*

Exp. Fluids. Vol. 29/7, S51-S60.

**Shannon C E (1949)**

*"Communication in the presence of noise"*

Proc. Institute of Radio Engineers, Vol. 37/1 no.1, pp 10-21

**Sinha SK(1988)**

*"Improving the accuracy and resolution of particle image or laser speckle velocimetry"*

Exp. Fluids, Vol. 6, pp 67-68

**Sinha SK, Kuhlman PS (1992)**

*"Investigating the use of stereoscopic particle streak velocimetry for estimating the three-dimensional vorticity field"*

Exp. Fluids, Vol. 12, pp 377-384

**Soloff SM, Adrian RJ, Liu Z-C (1997)**

*"Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry"*

Meas. Sci. Technol., Vol. 8, pp 1441-1454

**Soria J (1996)**

*"An Investigation of the Near Wake of a Circular Cylinder Using a Video-Based Digital Cross-Correlation Particle Image Velocimetry Technique".*

Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 12, pp 221-233

**Synnergren (1997)**

*"Measurement of three-dimensional displacement fields and shape using electronic speckle photography"*

Opt. Eng., Vol. 36, pp 2302–2310

**Tsai RY (1986)**

*"An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision",*

Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, pp. 364-374

**Van de Hulst, HC (1981)**

*"Light Scattering by Small Particles"*

Dover, New York

**Westerweel J (1993)**

*"Digital particle image velocimetry: theory and application"*

Delft University Press.

**Westerweel J, van Oord (1999)**

*"Stereoscopic PIV measurements in a turbulent boundary layer"*

In: Stainslaus M; Kompenhans J; Westerweel J (eds) Particle Image Velocimetry: progress toward industrial application. Kluwer, Dordrecht

**Westerweel J (1998)**

*"Effect of sensor geometry on the performance of PIV"*

9th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal

**Westerweel J, Dabiri D, Gharib M (1997)**

*"The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings"*

Exp Fluids, Vol. 23, pp. 20-28

**Westerweel, Nieuwstadt (1991)**

*"Performance tests on 3-dimensional velocity measurements with a two-camera digital particle-image velocimeter"*

In: Laser anemometry - Advances and applications 1991; Proceedings of the 4th International Conference, Cleveland, OH, Aug. 5-9, 1991. Vol. 1 (A93-23776 08-35), p. 349-355

**Willert CE, Gharib M (1991)**

*"Digital particle image velocimetry"*

Exp Fluids, Vol. 10, pp 181-193

**Willert CE, Gharib M (1992)**

*"Three-dimensional particle imaging with a single camera"*

Exp Fluids, Vol. 12, pp 353-358

**Willert C (1997)**

*"Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows"*

Meas. Sci. Technol., Vol. 8, pp 1465-1479

**Wieneke B (2005)**

*"Stereo-PIV Using Self-Calibration on Particle Images"*

Exp Fluids, Vol. 39, pp 267-280

**Wieneke B (2003)**

*"Stereo-PIV Using Self-Calibration on Particle Images"*

5th Int. Symp. on PIV, Sept 2003, Busan, Korea, p 3106

**Wieneke B (2001)**

*“PIV adaptive multi-pass correlation with deformed interrogation windows”*

First International PIV Challenge Symposium, Dtsch. Luft und Raumfahrtges. (DLR), Goettingen, Germany

**Yamamoto F, Wada A, Iguchi M, Ishikawa M (1996)**

*“Discussion of the Cross-Correlation Methods for PIV”*

J. of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 3, pp 65-78

**Zang W, Prasad AK (1997)**

*“Performance evaluation of a Sheimpflug stereocamera for stereoscopic particle image velocimetry”*

App Opt, Vol. 36, pp 8738-8744